



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

TESE DE DOUTORADO

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E PERIGO À
CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO SÃO SEBASTIÃO /
MARIZAL, RECÔNCAVO BAIANO.

MAÍRA SAMPAIO DA COSTA

SALVADOR

2023

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E PERIGO À
CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO SÃO SEBASTIÃO /
MARIZAL, RECÔNCAVO BAIANO.**

Maíra Sampaio da Costa

Orientador: Prof. Dra. Sérgio de Augusto Morais Nascimento

Co-orientadora: Profa. Dra. Maria da Conceição Rabelo Gomes

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutora em Geologia, Área de Concentração: Geologia ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2023

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Sampaio da Costa, Máira
AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E PERIGO À
CONTAMINAÇÃO DO AQUIFERO SÃO SEBASTIÃO / MARIZAL,
RECÔNCAVO BAIANO. / Máira Sampaio da Costa, Máira
Sampaio da Costa. -- Salvador, 2024.
98 f. : il

Orientador: Sérgio Augusto de Moraes Nascimento.
Coorientador: Ricardo Galeno Fraga de A. Pereira.
Tese (Doutorado - Geologia) -- Universidade
Federal da Bahia, Programa de Pós-Graduação em
Geologia, 2024.


1. Hidrogeologia. 2. Qualidade das águas
subterrâneas. 3. estatística. 4. vulnerabilidade. 5.
perigo de contaminação. I. Sampaio da Costa, Máira. I.
de Moraes Nascimento, Sérgio Augusto. II. Galeno
Fraga de A. Pereira, Ricardo . III. Título.

MAÍRA SAMPAIO DA COSTA

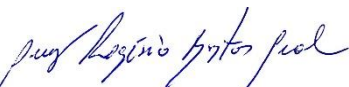
**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E PERIGO À
CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO SÃO SEBASTIÃO /
MARIZAL, RECÔNCAVO BAIANO.**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Doutora em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 05/12/2023.

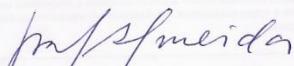
TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



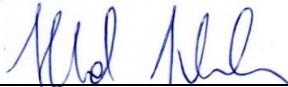
Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento (Orientador) – (UFBA)



Dr. Luiz Rogério Bastos Leal (UFBA)



Dra. Rosa Alencar Santana de Almeida (UFRB)



Dr. Harald Rene Klammler – (UFBA)



Dr. Manuel Vitor Portugal Gonçalves – (SEC-BA)

Salvador – BA
2023

À minha família.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES - Código de financiamento 001.



RESUMO

O sistema aquífero Marizal/São Sebastião é a principal fonte de abastecimento de água do município de Alagoinhas e regiões circunvizinhas (Estado da Bahia). Contudo, as intervenções antrópicas na região vêm contribuir para a poluição dos solos e do meio subterrâneo. A partir desse entendimento, o presente trabalho teve como objetivo estudar a vulnerabilidade e o perigo de contaminação do sistema aquífero em questão, associado ao estudo de qualidade das águas a partir de ferramentas estatísticas. Em estudos bibliográficos, foram analisados os principais métodos de investigação de vulnerabilidade de aquíferos em diferentes ambientes geológicos, selecionando as metodologias GOD, DRASTIC, AVI e COP como os mais relevantes na atualidade. Diante de comparações estabelecidas, conclui-se que os métodos GOD e DRASTIC apresentaram respostas mais adequadas para ambientes sedimentares, como a área de estudo, sendo desta forma selecionados para o presente estudo. Para a realização desse trabalho, foi realizado coleta *in situ* de 20 amostras de águas subterrânea no ano de 2021 e selecionadas 34 amostras de poços do banco de dados do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e banco de dados do SAAE (Sistema Autônomo de Água e Esgoto de Alagoinhas). Nesses dados foram aplicadas a análise fatorial e de agrupamento multivariada e estudo de vulnerabilidade (GOD e DRASTIC) e perigo de contaminação (POSH). Os resultados indicaram que as características composicionais do sistema aquífero São Sebastião/Marizal são os principais responsáveis pelos índices de vulnerabilidades encontrados nas áreas. As regiões preferencialmente constituídas pela Formação Marizal (região central da área) foram classificadas com vulnerabilidade intermediária à alta em resposta aos arenitos formadores dessa Formação geológica. Já as regiões delimitadas pela Formação São Sebastião apresentaram vulnerabilidade intermediária à baixa (regiões periféricas), como resposta à presença das intercalações de arenitos e folhelhos que proporcionam maior proteção ao sistema subterrâneo. O perigo de contaminação seguiu o mesmo padrão, em que a zona urbana apresentou o maior perigo de contaminação e a zona rural o menor perigo de contaminação. Além disso, os resultados estatísticos indicaram que as características das águas subterrâneas apresentaram maior influência das formações geológicas do que da contaminação ou poluição antrópica, indicando que apesar da elevada vulnerabilidade e perigo de contaminação de algumas áreas do município, o sistema aquífero, em geral, ainda se encontra preservado. Os parâmetros que são mais relevantes para a caracterização das águas subterrâneas são aqueles relacionados à salinidade da água (pH, CE, salinidade, cálcio, cloreto, bicarbonato, sulfato, fosfato, manganês e ferro), e indicaram que 70% das águas subterrâneas encontram-se dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS N° 888/2021 e pela Resolução do CONAMA 396/2008. Os parâmetros secundariamente relevantes foram aqueles atrelados à alcalinidade/acidez do meio aquoso (pH, bicarbonato e fosfato) e indicaram que a maior parte das águas subterrâneas desse sistema são ácidas (95%).

Palavras-chave: Sistema aquífero Marizal/São Sebastião, Vulnerabilidade, Estatística.

ABSTRACT

The Marizal/São Sebastião aquifer system is the main water supply source in the municipality of Alagoinhas and surrounding regions (state of Bahia). However, the human interventions in the region contribute to soil and underground pollution. Thus, the present study had the objective of investigating the vulnerability and danger of contamination in this aquifer system, associated with a study on water quality based on statistical tools. In bibliographic studies, the main methods for investigating aquifer vulnerability in different geological environments were analyzed, selecting GOD, DRASTIC, AVI and COP methods as the most relevant today. In view of conditional comparisons, it is concluded that the GOD and DRASTIC methods presented more appropriate responses for sedimentary environments, such as the study area, and were therefore selected for the present study. To carry out this work, 20 groundwater samples were taken in situ in the year 2021 and 34 samples from wells in the SIAGAS (Groundwater Information System) and SAAE (Alagoinhas Autonomous Water and Sewage System) databases were considered. Data was assessed using factorial analysis, multivariate cluster analysis, and evaluations on vulnerability (GOD and DRASTIC) and risk of contamination (POSH). The results indicated that the characteristics that compose the Marizal/São Sebastião aquifer system are the main factors responsible for the vulnerability indices found in the area. The regions that are preferentially composed by the Marizal Formation (central region of the area) were classified with intermediate to high vulnerability in response to the sandstones that form this geological Formation. In turn, the regions delimited by the São Sebastião Formation presented intermediate to low vulnerability (peripheral regions), which is in response to the presence of interleaved sandstones and shales that promoted greater protection to the underground system. The risk of contamination followed the same pattern, with the urban zone presenting the highest contamination hazard and the rural zone had the lowest hazard level. Moreover, the statistical results indicated that groundwater characteristics presented higher influence over the geological formations than human contamination or pollution, indicating that despite the high level of vulnerability and contamination hazard of some areas in the municipality, the aquifer system in general can still be considered preserved. The most relevant parameters to characterize groundwater were those related to water salinity (pH, EC, salinity, calcium, chloride, bicarbonate, sulfate, phosphate, manganese, and iron), and indicated that 70% of the groundwater is within the drinking water standards established by the Ministry of Health Ordinance No. 888/2021 and CONAMA Resolution 396/2008. The secondary relevant parameters were those related to the alkalinity/acidity of the aqueous medium (pH, bicarbonate, and phosphate) and indicated that most of the groundwater in this system is acidic (95%).

Keywords: Marizal/São Sebastião aquifer system, Vulnerability, Statistics.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: Introdução geral.....	11
CAPÍTULO 2: Artigo 1 – Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica	15
Introdução	16
Metodologia.....	17
Resultados e Discussões	25
Conclusões.....	30
CAPÍTULO 3: ARTIGO 2 - Vulnerabilidade e perigo à contaminação do sistema aquífero São Sebastião/Marizal, no município de Alagoinhas, Bahia.....	33
Introdução	34
Metodologia.....	36
Resultados e Discussões	42
Conclusões.....	51
CAPÍTULO 4: ARTIGO 3 - Subsídio para o Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Marizal/São Sebastião, Alagoinhas-Bahia.....	55
Introdução	56
Metodologia e Dados.....	58
Resultados	61
Conclusões.....	67
CAPÍTULO 5: Conclusões	74
Apêndice A: Justificativa da participação dos co-autores	77
Anexo A: Regras de formatação da revista de Geociências do Nordeste	79
Anexo B: Regras de formatação da Revista Anuário do Instituto de Geociências	85
Anexo C: Regras de formatação da Cadernos de Geociências	91
Anexo D: Comprovante de aceite do Artigo 1	97
Anexo E: Comprovante de aceite do Artigo 2.....	98

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

O sistema aquífero que será abordado localiza-se na Bacia Sedimentar do Recôncavo Norte, mais precisamente no município de Alagoinhas, Bahia. Ele é conhecido como sistema aquífero Marizal/São Sebastião, sendo amplamente utilizado para o abastecimento de água subterrânea nas zonas urbanas e rurais e nos setores indústrias do município sede e das regiões circunvizinhas (Moraes et al, 2004).

A elevada capacidade hídrica do sistema está diretamente correlacionada a natureza e a disposição litológica das Formações constituintes, no qual a Formação Marizal, localizada na camada superior, apresenta natureza livre, favorecendo a passagem de água pelo sistema e controlando a maior parte das recargas da unidade abaixo, a Formação São Sebastião. Essa última apresenta natureza dual, livre e semiconfinada, e armazena as águas infiltradas nas suas camadas confinada (Alves, 2015; LIMA, 1999; Lima & Ribeiro, 1982).

Como consequência, as características hidrodinâmicas do sistema são definidas como alta porosidade, alta permeabilidade e alta transmissibilidade hidráulica, o que proporciona elevado acúmulo de água subterrânea, mas torna a contaminação mais propícia e perigosa (Moraes et al., 2004; Nascimento et al. 2006).

A Formação Marizal apresenta característica sedimentar, sendo constituída principalmente por arenitos e conglomerados e secundariamente por siltitos, folhelhos e calcários. Seus sedimentos foram depositados em ambiente de leques aluviais e de sistemas fluviais entrelaçados, apresentando estratificações cruzadas de pequeno a grande porte, em sua maioria, de baixo ângulo. (LIMA, 1991; Ribeiro, 2008; Nascimento & Alves, 2014).

A Formação São Sebastião é constituída por arenitos maciços de granulometria fina à grosseira intercalados por argilas sílticas, que foram depositados em ambiente flúvio-deltáico, originando estratificações plano-paralela de baixo ângulo e/ou estratificações cruzadas acanaladas. Essa Formação foi dividida em três membros: Rio Joanes (membro superior), Passagem dos Teixeiras (membro médio) e Paciência (membro inferior) (Nascimento & Alves, 2014; Alves, 2015; Nascimento et al., 2016).

No Membro Paciência, os arenitos são levemente calcíferos e feldspáticos e são intercalados por argila, siltitos e folhelhos. No membro Passagem dos Teixeiras ocorrem espessos bancos de arenitos, que são intercalados por camadas delgadas de argilas sílticas e folhelhos sílticos. Esses dois Membros apresentam natureza semiconfinada e são responsáveis pela acumulação abundante de água, conferindo elevado potencial hídrico que atinge valores entre 100 m³/h e 300 m³/h de vazão (Leite, 1964; Lima, 1999).

Por fim, no Membro Rio Joanes ocorrem arenitos intercalados por argilas silticas, folhelho e siltitos. Esse membro apresenta natureza livre, sendo um reservatório de armazenamento limitado, mas de grande importância, pois controla a recarga dos membros abaixo (Moraes et al. 2004; Nascimento & Alves, 2014; Alves, 2015).

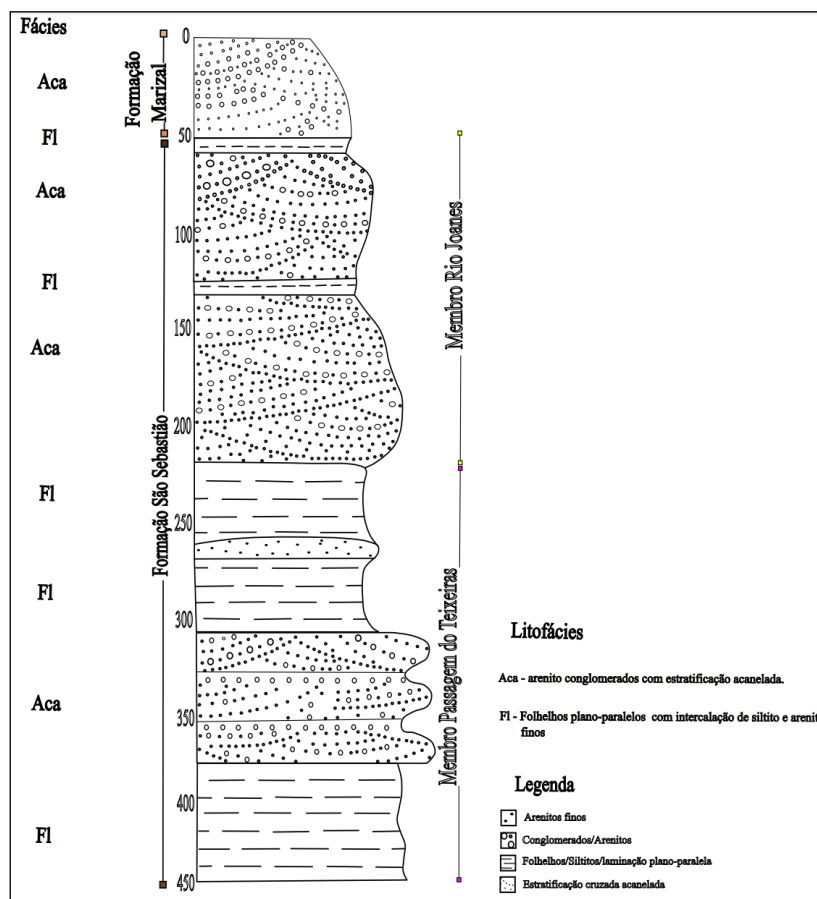


Figura 1. Coluna estratigráfica das Formações Marizal e São Sebastião na região de Alagoinhas. Adaptado de Frambrini et al 2011; PETROBRAS/UFBA, 2012; Costa, 2015.

Essa pesquisa tem como objetivo geral avaliar a vulnerabilidade e perigo à contaminação do sistema aquífero Marizal / São Sebastião e sua influência na qualidade da água subterrânea. De maneira mais específica, busca: *i.* aplicar a análise multivariada para definir as variáveis que melhor caracterizam a água subterrânea e definir sua qualidade; *ii.* avaliar a vulnerabilidade intrínseca do sistema em estudo com o auxílio de mapas temáticos vinculados aos métodos DRASTIC (Aller *et al.* 1987) e GOD (Foster, 1987); *iii.* determinar as potenciais fontes de contaminação utilizando o método POSH (Foster et al. 2002); *vi.* e apontar o perigo de contaminação da área.

Esses questionamentos norteadores foram respondidos em três artigos científicos, submetidos para as revistas: Revista de Geociências do nordeste – REGNE (aceito); Revista Anuário do Instituto de Geociências (A2); e Pesquisas em Geociências.

Referências

Alves, E.J. Estudo hidrogeoquímico comparativo entre os membros da Formação São Sebastião, Recôncavo Norte – BA. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia., p.27-37, 2015.

Costa, E.G. Fácies sedimentares e composição de folhelhos da Formação Irati (Eopermiano) da bacia do Paraná na região de Bom Retiro, leste de Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina. Trabalho de Conclusão de Curso, p.37-41, 2015.

Fambrini, L.G.; Lemos, R.D.; Tesser Jr, S.; Araújo, T.J.; Silva-Filho, F.W, Souza, C.Y.B.; Neumann, L.M.H.V. Estratigrafia, Arquitetura Depositional e Faciologia da Formação Missão Velha (Neojurássico-Eocretáceo) na Área-Tipo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: Exemplo de Sedimentação de Estágio de Início de Rifte a Clímax de Rifte. Revista do Instituto de Geociências - USP, v. 11, n. 2, p. 55-87, 2011.

Leite, D.C. Possibilidade de água subterrânea na Bacia do Recôncavo Baiano. Rel Int, Petrobrás, Salvador – BA, 1964.

Lima, O.A.L. Avaliação hidrogeofísica de arenitos aquíferos na Bacia Recôncavo-Tucano (BA). In: Anais, 2º Com. Grupo Internat. Soc. Bras. Geof., Salvador: SBGf, v. 1, p.1016-1022, 1991.

Lima, O.A.L. Características hidráulicas e padrões de poluição no aquífero Recôncavo na região de Camaçari – Dias D'Ávila. Tese Prf. Titular, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.

Lima, O.A.L & Ribeiro, A.C. 1982. Caracterização hidrogeológica do aquífero São Sebastião na área de captação do CIA/BA, usando perfilagens elétricas de poços, Rev. Bras. Geof, v.1, n.1, p. 11 -22.

Moraes, S.R.L., Silva, J.B., Luz, D.L., Rêgo, M.J.M., Carvalho, F.M., Machado, L.N., Lima, L.A.O., Machado, L.S., Nascimento, S.A.M., Filho, A.S.S., Orrico, M.R.S., Zanta, M.V., Pereira, A.P., Santana, A.V.A., Sant'anna, M.A., Sobrinho, S.G.D., Cairo, C.F.I., Matos, T.C.C.J., Rocha, B.M., Pereira, S.O & Santana, A.R., Silva, S.S. Plano Municipal de Saneamento ambiental de Alagoinhas, tomo I, vol. 2, p.177, 2004.

Nascimento, M.A.S., Moraes, S. R.L. & Santana, A.V.A. 2006. Estudo quali-quantitativo das águas subterrâneas no Município de Alagoinhas-Bahia como componente do Plano Municipal de Saneamento Ambiental. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Anais Curitiba, Águas Subterrâneas, p.14, 2006.

Nascimento, S.A. de M.; Alves, J.E. 2014. Estudo hidrogeoquímico comparativo entre os aquíferos Barreiras, Marizal e São Sebastião na região do Recôncavo Norte, Estado da Bahia. *Cadernos de Geociências*, v.11, n. 1-2, p.72-73.

Nascimento, M.A.S., Leal, B.R.L., Purificação, C.G.C. A utilização da análise de variância (ANOVA) na distinção de Aquíferos Sedimentares na região do Recôncavo Norte, Estado da Bahia. *Águas Subterrâneas*, v.30, n.3, p.411-426, 2016.

PETROBRÁS/UFBA - Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente. Estudo de Disponibilidade Hídrica e Projeção de Cenários Futuros nas Bacias Hidrográficas do Recôncavo Norte, Inhambupe e seus Domínios Aquíferos (Estado da Bahia). Relatório Interno. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

Ribeiro, L.G. Avaliação geolétrica da contaminação urbano-industrial do aquífero Recôncavo no entorno de Alagoinhas, Bahia, Monografia de graduação, Universidade Federal da Bahia, p.02-06 2008.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1 – Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica



REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE
Northeast Geosciences Journal

v. 8, nº 1 (2022)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1ID26339>



Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica

Aquifer vulnerability to pollution: a methodological review

Maíra Sampaio da Costa¹; Maria da Conceição Rabelo Gomes²; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento³

¹ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, Brasil. Email: mairasampaio42@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0973-0822>

² Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza/CE, Brasil. Email: conceicaoabelo@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7841-4201>

³ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, Brasil. Email: sergiomn@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1751-2323>

Resumo: As águas subterrâneas representam o maior volume de água doce disponível do planeta Terra, por isso, são consideradas um recurso indispensável para o abastecimento humano. Todavia, o avanço da civilização contribuiu para a poluição dos aquíferos, o que ampliou a necessidade de remediação e preservação desses sistemas. Devido a isso, pesquisadores estudam, desde a década de 60, o conceito de vulnerabilidade de aquíferos, proporcionando recentemente o entendimento que o grau de vulnerabilidade de um aquífero está associado a um conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada e/ou do aquífero confinante, que controlam a chegada de contaminantes ao sistema subterrâneo. Concomitantemente, o aprofundamento desse estudo foi possível graças ao viés matemático adotado, possibilitando o desenvolvimento de metodologias cartográficas que delimitam classes de vulnerabilidade, como o COP, o DRASTIC, o GOD e o AVI. No entanto, essas metodologias utilizam formulações com diferentes critérios físicos e geológicos, resultando em mapas distintos para uma mesma área de estudo. Considerando essa particularidade, este trabalho propõe apresentar a revisão bibliográfica das quatro metodologias citadas, visando indicar a melhor empregabilidade destas metodologias frente aos distintos ambientes geológicos e geográficos.

Palavras-chave: Métodos matemáticos; Revisão bibliográfica; Vulnerabilidade.

Abstract: Groundwater represents the largest volume of fresh water available on planet Earth, therefore, it is considered to be an essential resource for humanity's water supply. However, the advance of civilization has contributed to the pollution of aquifers, which has increased the necessity for the remediation and preservation of these systems. Hence, since the 1960s, researchers have been studying the vulnerability of aquifers, which has led to an understanding that the degree of vulnerability of an aquifer is associated with a set of physical, chemical and biological characteristics of the unsaturated zone and/or from the confining aquitard, which control the arrival of contaminants into the underground system. Simultaneously, delving into this study has been possible thanks to the mathematical approach that has been adopted, enabling the development of cartographic methodologies which delimit vulnerability classes, such as COP, DRASTIC, GOD and AVI. Despite that, these methodologies use formulations with different physical and geological criteria, resulting in different maps for the same study area.

Considering this particularity, the 16iferent study proposes to introduce a methodological review of the four above-mentioned methodologies, aiming to designate their most appropriate uses in 16iferente geological and geographic environments.

Keywords: Mathematical methods; Methodological review; Vulnerability.

1. Introdução

As águas subterrâneas são o maior volume de água doce e líquida do planeta Terra, representando cerca de 10.3 milhões km³, enquanto os lagos e rios, ocupando a segunda posição, acumulam somente cerca de 104 mil km³. Além disso, os aquíferos apresentam baixa suscetibilidade à poluição quando comparados aos mananciais superficiais, o que os tornam indispensáveis para o abastecimento hídrico de residências e dos setores de produção (BABIKER *et al.*, 2005; REBOUÇAS, 2008).

No entanto, devido ao avanço civilizatório, a indiscriminada poluição ambiental e seu consequente reflexo nos aquíferos, se tornou um tema de discussão para pesquisadores ambientais e para governantes, impulsionando estudos e, posteriormente, o entendimento que a poluição das águas subterrâneas provoca, muitas vezes, impactos irreversíveis para o ecossistema (BABIKER *et al.*, 2005).

A poluição das águas subterrâneas pode ter diversas origens, no entanto, as mais comuns estão relacionadas com as atividades industriais, domésticas e agrícolas. Essa primeira atividade pode poluir os aquíferos através de descartes de compostos químicos, de metais, de elementos radioativos, do chorume e de acidentes com produção química. A segunda pode poluir através do chorume de aterros sanitários e lixos e acidentes com fossas sépticas e redes de esgotos. Por fim, a última pode poluir através de solutos dissolvidos por chuvas ou irrigação, fertilizantes e pesticidas (HIRATA; FERNANDES, 2008).

Como a remediação de aquíferos é frequentemente despendiosa e impraticável, o aprofundamento de estudos sobre a vulnerabilidade e preservação desses sistemas se tornou imprescindível, possibilitando o desenvolvimento de conceitos sobre o tema a partir de estudos como Le Grand (1964), Albinet & Margat (1970), Taltasse (1972), Aller *et al.* (1987), Bachmat & Collin (1987), Foster & Hirata (1988), VRBA & Zaporozec (1994), Hirata & Fernandes (2008), Cutrim & Campos (2010); e Yu & Michael (2019).

Utilizando-se de definições porpostas por Cutrim & Campos (2010) pode-se compreender que a vulnerabilidade intrínseca de um aquífero está relacionado ao conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada do sistema e/ou do aquífero confinante, que controlam a chegada do contaminante ao sistema. Já a vulnerabilidade específica está relacionada a fatores extrínsecos, como uma carga ou uma atividade contaminante.

Um dos métodos aliados a esse estudo é a cartografia de vulnerabilidade de aquíferos, que foi inicialmente investigada por Le Grand (1964), Seller & Canter (1980) e Cartel *et al.* (1987). A cartografia de vulnerabilidade é uma ferramenta preventiva capaz de distinguir as zonas de vulnerabilidade de um aquífero, o que possibilita a análise da capacidade de sua proteção natural (HIRATA; FERNANDES, 2008).

Devido aos avanços tecnológicos, a cartografia de vulnerabilidade se associou às técnicas de geoprocessamento implementadas em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Este feito ampliou a capacidade de análise espacial, resultando na redução do tempo de trabalho e no aumento da precisão das informações (PAULA; SOUZA, 2011).

Ao longo do tempo, muitos métodos de cartografia de vulnerabilidade foram desenvolvidos, todavia, suas fórmulas foram fundamentadas em diferentes critérios físicos e geológicos. Devido a isso, quando uma mesma área é estudada por diferentes métodos cartográficos, os mapas obtidos apresentam zonas de vulnerabilidades diferentes.

Considerando essa particularidade, este trabalho propõe apresentar uma revisão bibliográfica a cerca de quatro metodologias utilizadas na cartografia de vulnerabilidade, sendo elas, DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), GOD (FOSTER; HIRATA, 1988), COP (VÍAS *et al.*, 2002; 2006) e AVI (STEMPVOORT *et al.*, 1992), visando sugerir uma melhor empregabilidade delas frente aos distintos ambientes geológicos e geográficos.

2. Metodologia

2.1 Metodologia COP

Desenvolvida por Viás *et al.* (2002; 2006) baseando-se nas premissas da Ação Europeia COST 620, a metodologia COP foi inicialmente idealizada para regiões de clima semi-árido, sobretudo em locais de baixa pluviosidade, com o propósito de avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos (ZWHALEN, 2003; ABDULLAH *et al.*, 2020). No entanto, devido aos seus resultados satisfatórios, essa metodologia passou a ser utilizada em muitos países, como África, Cuba, China, Alemanha, Eslovênia, França, Itália, Portugal e Brasil (NOSSA, 2011).

Segundo Viás *et al.* (2006) e Nossa (2011), a metodologia COP utilizada em seus cálculos três variáveis com pesos iguais: (C) concentração do fluxo, (O) camadas de proteção e (P) precipitação.

O fator C corresponde a intensidade com que as águas das chuvas atravessam a zona não saturada e infiltram no interior das cavidades cársticas. Assim, essa variável representa a influência da infiltração para a vulnerabilidade de um aquífero. Este fator está atrelado a dois cenários possíveis:

Cenário 1: Situação na qual as zonas de recarga são recobertas por finas camadas de baixa permeabilidade ou encontram-se aflorantes, favorecendo a infiltração concentrada e resultando em um fluxo que penetra facilmente pela zona não saturada. O fator (C), neste caso, é representado por quatro variáveis: a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (dh) e dolinas (ds) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). A declividade é subdividida em quatro classes associada a presença ou ausência da cobertura vegetal, originando o subparâmetro (sv). O fator C é registrado como:

$$\text{Fator (C)} = sv \times ds \text{ ou } sv \times dh$$

Cenário 2: Situação na qual a recarga ocorre a partir de infiltração difusa. O fator (C) é subdividido em três fatores: feições superficiais (sf), declividade (s) e vegetação (v). As feições superficiais (sf) englobam formas geomorfológicas específicas de rochas carbonáticas e a presença ou ausência de camadas de recobrimento, que influenciam no processo de escoamento superficial e/ou infiltração. A declividade e vegetação entram como parâmetros correlacionados (sv). O fator (C) é registrado como:

$$\text{Fator (C)} = sv \times sf$$

O fator O corresponde a proteção intrínseca do aquífero, que é representado pela textura, litologia e espessura das camadas acima da zona saturada. Esse fator considera que a capacidade de atenuação de contaminantes aumenta proporcionalmente com o aumento das camadas de proteção. Para calcular o fator (O) aplica-se os subfatores solo [OS] e litologia [OL].

$$\text{Fator O} = [Os] + [OL]$$

O fator P representa a precipitação e as variáveis que influenciam na taxa de infiltração, como frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de chuvas. Estas variáveis determinam a atuação da precipitação no transporte de contaminantes da superfície para o aquífero, em que quanto maior for a capacidade de transporte de contaminantes, maior será a vulnerabilidade do aquífero. O fator (P) é representado por dois subfatores: quantidade de precipitação [PQ] e distribuição temporal da precipitação [PI].

$$\text{Fator P} = [Pq] + [PI]$$

Por fim, o índice COP é calculado através da equação:

$$\text{COP Índex} = \text{Factor C} \times \text{Factor O} \times \text{Factor P}$$

As classes de vulnerabilidade e os valores adotados para cada fator são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Classes de vulnerabilidade pela metodologia COP.

Fator C	Redução da proteção
0 - 0.2	Muito alta
0.2 - 0.4	Alta
0.4 - 0.6	Moderada
0.6 - 0.8	Baixa
0.8 - 1.0	Muito baixa
Fator O	Redução da proteção
1	Muito baixa
2	Baixa
2 - 4	Moderada
4 - 8	Alta
8 - 12	Muito alta
Fator P	Redução da proteção
0.4 - 0.5	Muito alta
0.6	Alta
0.7	Moderada
0.8	Baixa
0.9 - 1.0	Muito baixa
Índice COP	Classe de vulnerabilidade
0 - 0.5	Muito alta
0.5 - 1.0	Alta
1.0 - 2.0	Moderada
2.0 - 4.0	Baixa

Fonte: Viás et al. (2006).

Fator	Subfator	Variável	Variável	Valor
C	Cenário A: áreas de recarga (cavidades cársticas)	Distância dos sumidouros (dh)	<500 m	0,0
			500 - 1000m	0,1
			1000-1500m	0,2
			1500-2000m	0,3
			2000-2500m	0,4
			2500-3000m	0,5
			3000-3050m	0,6
			3500-4000m	0,7
			4000-4500m	0,8
			4500-5000m	0,9
	>5000m	1,0		
	Distância das Dolinas (ds)	<10m	0,0	
		10-100m	0,5	
		>100m	1,0	
	Declividade e Cobertura vegetal (sv)	≤8%	1,0	
		8-31%, elevada	0,95	
		8-31%, pouca ou ausente	0,90	
		31-76%, elevada	0,85	
		31-76% pouca ou ausente	0,80	
	>76%	0,75		
Cenário B: Demais áreas do aquífero	Feições cársticas e camadas superficiais (sf)	Carste muito desenvolvido, ausente	0,25	
		Carste muito desenvolvido, permeável	0,50	
		Carste muito desenvolvido, impermeável	0,75	
		Carste pouco desenvolvido, ausente	0,50	
		Carste pouco desenvolvido, permeável	0,75	
		Carste pouco desenvolvido, impermeável	1,0	
		Carste fissurado, ausente	0,75	
		Carste fissurado, permeável	0,75	
		Carste fissurado, impermeável	1,0	
		Ausência de feições cársticas, ausente	1,0	
		Ausência de feições cársticas, permeável	1,0	
		Ausência de feições cársticas, impermeável	1,0	
		Declividade e cobertura vegetal (sv)	≤8%	0,75
			8-31%, elevada	0,80
			8-31%, pouca ou ausente	0,85
31-76%, elevada	0,90			
31-76%, pouca ou ausente	0,95			
O	Solos [Os]	Textura e espessura	Argiloso, >1,0m	5,0
			Argiloso, 0,5 - 1,0m	4,0
			Argiloso, <0,5m	3,0
			Siltoso, >1,0m	4,0
			Siltoso, 0,5- 1,0m	3,0
			Siltoso, <0,5m	2,0
			Argilo-arenoso, >1,0m	3,0
			Argilo-arenoso, 0,5-1,0m	2,0
			Argilo-arenoso, <0,5m	1,0
			Arenoso, >1,0m	2,0
	Arenoso, 0,5-1,0m	1,0		
	Arenoso, <0,5m	0,0		
	Litologia [OL]	Litologia e faturamento (ly)	Argila	1500
			Silte	1200
			Metapelitos e rochas ígneas não fraturadas	1000
			Calcários com margas	500
			Metapelitos e rochas ígneas fraturadas	400
			Conglomerados e brechas cimentados ou não fraturados	100
			Arenito	60
			Conglomerados e brechas pouco fraturados ou cimentados	40
Areia e cascalho			10	
Basaltos fraturados			5	
Rochas cársticas fraturadas	3			
Rochas cársticas não fraturadas	1			
Condições de confinamento (cn)	Confinado	2,0		
	Semi-confinado	1,5		
	Não confinado	1,0		
	Espessura da litologia considerada (m)	<250m	1	
		250-1.000m	2	
1.000-2.500m		3		
2.500-10.000m		4		
>10.000m		5		
P	Quantidade [Pq]	Média anual das precipitações no período chuvoso	>1600 mm/ano	0,4
			>1200 e ≤1600 mm/ano	0,3
			>800 e ≤1200 mm/ano	0,2
			>400 e ≤ 800 mm/ano	0,3
	Intensidade [Pi]	Distribuição temporal	<400 mm/ano	0,4
			<10 mm/dia	0,6
			≥10 e ≤ 20 mm/dia	0,4
			>20 mm/ dia	0,2

Tabela 2 – Valores atribuídos para cada fator da metodologia COP. Fonte: Viás et al. (2006).

2.2 Metodologia DRASTIC

Desenvolvida na Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos por Aller *et al.* (1987), a metodologia DRASTIC é uma ferramenta que avalia a vulnerabilidade de aquíferos com diversas configurações hidrogeológicas e é amplamente utilizada em mapeamento de detalhe (THIRUMALAIVASAN *et al.*, 2003).

Essa metodologia utiliza sete variáveis em sua equação denominadas sub-índice *i*: **D** (*Depth*) profundidade do topo do aquífero em metros; **R** (*Recharge*) recarga do aquífero em mm/ano; **A** (*Aquifer material*) tipo de material do meio aquífero; **S** (*Soil*) tipo de solo; **T** (*Topography*) topografia; **I** (*Influence of the unsaturated zone*) influência da zona não saturada do solo; e, **C** (*Conductivity*) condutividade hidráulica do aquífero em cm/seg (THIRUMALAIVASAN *et al.*, 2003), descritas na Tabela 3.

Através de cálculos matemáticos, Aller *et al.* (1987) atribuiu valores para cada sub-índice, conforme a Tabela 4. Além disto, a metodologia vale-se de um sistema de peso denominado sub-índice *p*, na qual, os sub-índices *i* mais relevantes possuem pesos maiores e os menos relevantes pesos menores (Tabela 3).

Tabela 3 – Peso para cada sub-índice *i* da metodologia DRASTIC.

Fator	Descrição	Peso
Profundidade	Refere-se a profundidade entre a superfície e a zona saturada. Maiores profundidades implicam em menor chance de ocorrência de contaminação.	5
Recarga do aquífero	Refere-se ao montante de água que penetra na superfície e alcança o lençol freático. A recarga da água representa o veículo de transporte dos poluentes.	4
Material do aquífero	Refere-se as propriedades do material da zona saturada, que controla os processos de atenuação dos poluentes.	3
Solo	Representa a porção superior desgastada da zona não saturada e controla o volume de recarga do aquífero	2
Topografia	Representa a inclinação da superfície terrestre. Dita se o contaminante permanecerá na superfície ou se infiltrará para a zona saturada.	1
Influência da zona não saturada	É definido como o material da zona vadosa. Controla a passagem e atenuação dos contaminantes para a zona saturada.	5
Condutividade Hidráulica	Indica a habilidade do aquífero de transmitir a água, conseqüentemente determina a taxa de fluxo dos contaminantes dentro do sistema.	3

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Por fim, o grau de vulnerabilidade de um aquífero é obtido a partir da equação abaixo e é agrupado em classes de vulnerabilidade que variam de baixo à muito alto (Tabela 4).

26	71	126	180	226
Baixo	Médio	Alto	Muito alto	

$$D_{rastic} = D_i D_p + R_i R_p + A_i A_p + S_i S_p + T_i T_p + I_i I_p + C_i C_p$$

Tabela 4 – Peso dos sub-índices e classificação da vulnerabilidade pelo método DRASTIC.

Profundidade	Valor atribuído	Peso
0 - 1.5	10	5
1.5 - 4.5	9	
4.5 - 9	7	
9 - 15	5	
15 - 22.5	3	
2.5 - 30	2	
>30	1	
Recarga de aquífero	Valor atribuído	Peso
<51	1	4
51 - 102	3	
102 - 178	6	
178 - 254	8	
> 254	9	
Litotipo	Valor atribuído	Peso
Folhelhos maciço	1 - 3	3
Ígneas metamórficas	2 - 5	
Ígnea metamórficas intemperizadas	3 - 5	
Till glacial	4 - 6	
Arenito acamadado, calcário e folhelho	5 - 9	
Arenito maciço	4 - 9	
Calcário maciço	4 - 9	
Arenito e cascalho	4 - 9	
Basalto	2 - 10	
Calcário cárstico	9 - 10	

Tipo de solo	Valor atribuído	Peso
Fino ou ausente	10	2
Cascalho	10	
Arenoso	9	
Turfoso	8	
Argila agregada e/ou contraída	7	
Marga arenosa	6	
Marga	5	
Argila margosa	3	
Lixo esterco	2	
Argila desagregada e não expansível	1	
Condutividade hidráulica	Valor atribuído	Peso
40.7 – 81.5	8	3
4.1 – 12.2	2	
28.5 – 40.7	6	
12.2 – 28.5	4	
0 -4.1	1	
>81.5	10	
Inclinação do relevo	Valor atribuído	Peso
0 -1	10	1
1 – 6	9	
6 – 12	5	
12 – 18	3	
18	1	
Zona vadosa	Valor atribuído	Peso
Camada confinante	1	5
Silte / argila	2-6	
Folhelho	2-5	
Calcário	2-7	
Arenito	4-8	
Calcário acamadado, arenito, folhelho	4-8	
Areia e cascalho com significativo silte e argila	4-8	
Ígneas metamórficas	2-8	
Areia e cascalho	6-9	
Basalto	2-8	
Calcário cárstico	8-10	

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987).

2.3 Metodologia AVI

Desenvolvida por Stempvoort *et al.* (1992) no Instituto Nacional de Pesquisa Hidrológica do Canadá (NHRI), a metodologia AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) é responsável por avaliar a vulnerabilidade de aquíferos de forma simples, devido a utilização de poucos parâmetros nos seus cálculos matemáticos (SANTOS; PEREIRA, 2011).

O principal índice considerado é a resistência hidráulica (C), que reflete a resistência da zona vadosa ao fluxo vertical, ou seja, o tempo que os poluentes levam para atravessar a zona não saturada (BUSICO *et al.*, 2019). O fator (C) é obtido pela divisão dos subfatores condutividade hidráulica [D_i] e espessura da camada sedimentar (K i).

O fator D_i , nomeada como condutividade hidráulica, representa a taxa de fluidez da água no sistema, expressando a velocidade que os contaminantes se movem através do aquífero. Desta forma, quanto maior o D_i de uma área, maior será o transporte de contaminantes, o que favorece a maior vulnerabilidade de um aquífero (BUSICO *et al.*, 2019).

O fator K_i representa a espessura da camada sedimentar do sistema, na qual, considera-se que maiores espessuras de camada favorecem a diluição dos contaminantes até o aquífero, proporcionando uma menor vulnerabilidade do sistema. Assim como o cenário oposto (ZHONG, 2005).

Por fim, o grau de vulnerabilidade de um aquífero é obtido através da equação abaixo e é agrupado em classes de vulnerabilidade que variam de baixo à muito alto, conforme tabelas 5 e 6.

$$C = \sum D_i / K_i$$

Tabela 5 – Classes de condutividade hidráulica pelo metodologia AVI.

Condutividade hidráulica	
Classe	Valor (m/dia)
Baixa	0,07
Moderadamente baixa	0,31
Moderada	1,00
Moderadamente alta	2,25
Alta	3,75
Muito alta	5,00

Fonte: Van stempvoort et al. (1992).

Tabela 6 – Classes de vulnerabilidade pelo metodologia AVI.

Resistência hidráulica (dias)	Classes de vulnerabilidade
0-10	Extremamente alta
10-100	Alta
100-1.000	Moderada

Fonte: Van stempvoort et al. (1992).

2.4 Metodologia GOD

A metodologia GOD, desenvolvida no Reino Unido por Foster (1987), é uma ferramenta que avalia a vulnerabilidade de aquíferos de forma básica, devido a utilização de poucos variáveis nos cálculos matemáticos (RIBEIRO *et al.*, 2001; ONI *et al.*, 2017).

Na sua equação, a metodologia utiliza três variáveis com pesos iguais denominadas sub-índice i , sendo elas: Tipo de Aquífero (G); Litologia e Grau de Consolidação da Zona Vadosa ou Camadas Confinantes (O); e Profundidade do nível d'água ou da base confinante do aquífero (D) (RIBEIRO *et al.*, 2011; GUETTAIA *et al.*, 2017; MFONKA *et al.*, 2018).

O fator G, que corresponde ao tipo de aquífero, é classificado como livre, semi-confinado ou confinado. Cada tipo de aquífero influencia na quantidade de contaminantes vindos da superfície que é capaz de penetrar no lençol freático (CUTRIM & CAMPOS, 2010).

O fator O corresponde a litologia e o grau de consolidação da zona vadosa. Ele influencia na transmissividade de contaminantes até o aquífero e está intrinsecamente associado as variações de porosidade e/ou permeabilidade das rochas. A respeito disso, Cutrim & Campos (2010) explica que uma rocha de granulometria grossa tem menor capacidade de atenuação dos contaminantes quando comparado a uma rocha de granulometria fina.

O fator D corresponde a profundidade do nível d'água, desta forma, também representa a profundidade que o contaminante terá de percorrer para alcançar a zona saturada do aquífero (CUTRIM; CAMPOS, 2010).

Por fim, o grau de vulnerabilidade de um aquífero é obtido através da equação abaixo e é agrupado em classes de vulnerabilidade, que variam de insignificante à extrema, conforme Figura 1 e Tabela 7.

$$GOD = G_i * O_i * D_i$$

Figura 1 – Classes de vulnerabilidade pela metodologia GOD.

Fonte: Foster (1987).

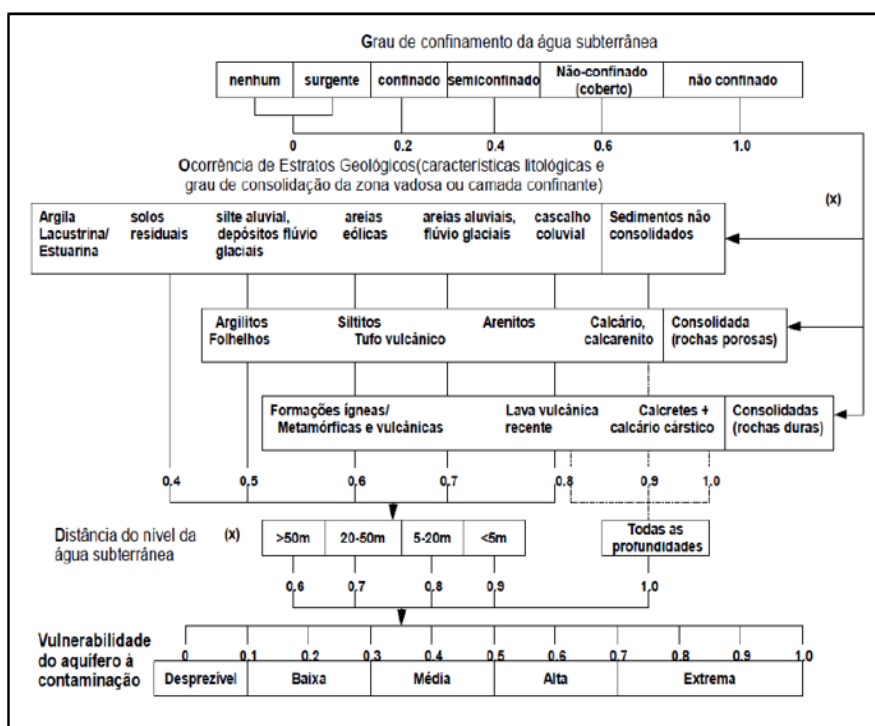


Tabela 7 – Classes de vulnerabilidade pela metodologia GOD.

Classes de vulnerabilidade	Definição Correspondente
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação
Alta	Vulnerabilidade a muitos contaminantes, exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados.
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).

Fonte: adaptado de Foster (1987).

3. Resultados e discussão

Para estabelecer comparações entre as metodologias apresentadas, contou-se com os trabalhos de Vías *et al.* (2006), Kazakis & Voudouris (2011), Fraga *et al.* (2013) e Putranto & Yusrizal (2018).

Vías *et al.* (2006) utilizaram as quatro metodologias em foco (COP, DRASTIC, AVI e GOD), para o estudo da vulnerabilidade de dois aquíferos cársticos, o Sierra de Líbar e o Torremolinos, no sul da Espanha. A respeito da litologia, o primeiro aquífero é constituído majoritariamente por calcários carstificados do Jurássicos, e o segundo é constituído por mármore do Triássico menos carstificado.

A partir dos resultados cartográficos (Figura 2 e 3), concluiu-se que o mapa obtido através da metodologia COP apresentou mais delimitações das classes de vulnerabilidade do que as demais metodologias. Isso ocorreu porque o COP utiliza variáveis específicas para aquíferos cársticos, possibilitando resultados mais satisfatórios nesse tipo de sistema. No entanto, devido à essa especificidade, seu uso foi desaconselhado para outros tipos de aquíferos. Além disto, essa metodologia baseia-se em oito variáveis e por isso necessita de um volumoso banco de dados, sendo normalmente utilizado em escala de detalhe.

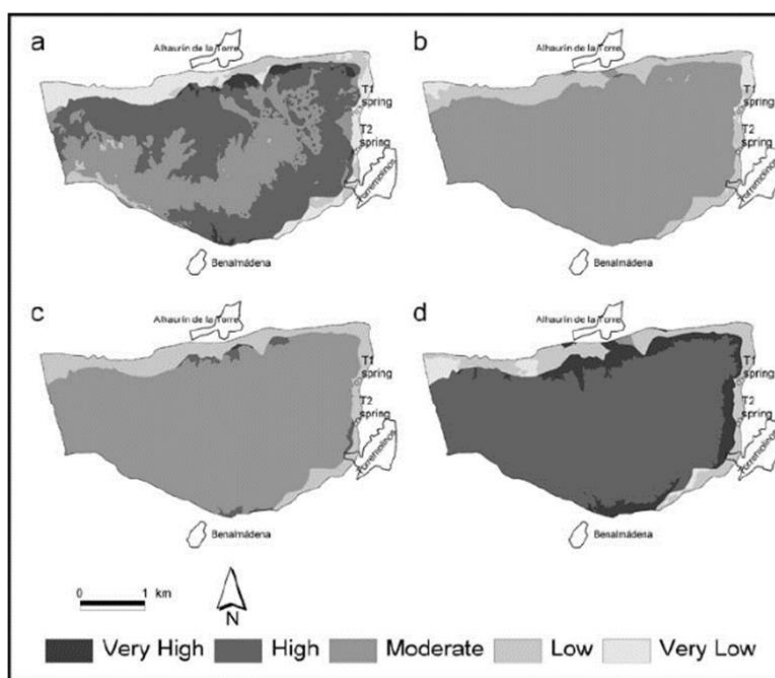


Figura 2 – Mapas de vulnerabilidade obtidos a partir as metodologias COP (a), DRASTIC (b), GOD (c) e AVI (d) em Torremolinos. Fonte: Viás et al. (2006).

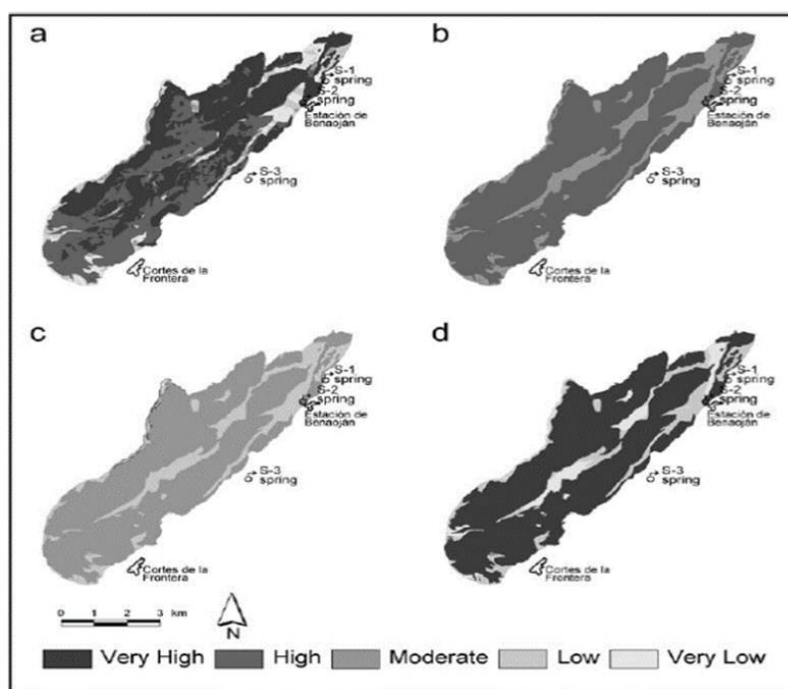


Figura 3 – Mapas de vulnerabilidade obtidos a partir das metodologias COP (a), DRASTIC (b), GOD (c) e AVI (d) em Sierra de Líbar. Fonte: Viás et al. (2006).

Fraga et al. (2013) utilizaram os métodos DRASTIC, AVI e GOD para o estudo da vulnerabilidade da bacia hidrográfica do rio Sôrdo, em Portugal. Essa bacia é constituída majoritariamente por metassedimentos Paleoproterozoicos, cobertos por sedimentos aluviais.

A partir dos resultados cartográficos (Figura 4), concluiu-se que o mapa obtido através da metodologia DRASTIC apresentou mais delimitações de classes de vulnerabilidade do que as demais metodologias. Tal resultado pode estar associado a formulação dessa metodologia, que é suportada por sete variáveis, o que também lhe garante maior confiabilidade de resultados.

Além disso, Fraga *et al.* (2013) sugerem que por ser uma metodologia que necessita de um banco de dados volumoso, é mais indicado para estudos de escala de detalhe e com disponibilidade de dados.

As desvantagens dessa metodologia, segundo Putranto & Yusrizal (2018), referem-se: *i.* ao sistema de pesos adotado, considerado como cálculo matemático subjetivo; *ii.* à dificuldade de precisar a recarga da água subterrânea, já que esta variável necessita de informações a respeito da evapotranspiração, chuva e escoamento da água; *iii.* à dúvida quanto à necessidade da topografia nos cálculos, já que é uma variável menos influente no resultado final.

O mapa obtido através da metodologia GOD apresentou intermediárias delimitações de classes de vulnerabilidade quando comparado aos demais mapas (Figura 4). Este resultado reflete a simplicidade da formulação da metodologia, que utiliza no seu cálculo apenas três variáveis. Devido a isso, o GOD pode ser aproveitado para rápidos diagnósticos de vulnerabilidade, para decisões ambientais urgentes e para escalas regionais que precisam de pouco detalhamento.

A desvantagem da metodologia GOD, segundo Putranto & Yusrizal (2018), trata-se dessa simplicidade explanada, que repercute nas limitações das delimitações das classes de vulnerabilidade, o que resulta em uma menor confiabilidade dos resultados.

Por fim, a metodologia AVI apresentou a menor delimitação das classes de vulnerabilidade quando comparado aos demais mapas (Figura 4), sendo por isso considerada a menos eficaz e realista das três ferramentas. Por outro lado, devido a simplicidade dos seus cálculos, que considera apenas duas variáveis, foi reconhecida como uma ferramenta capaz de oferecer rápidos diagnósticos quanto a vulnerabilidade de uma área, podendo ser utilizadas para decisões ambientais urgentes e para escalas regionais.

Contudo, segundo Putranto & Yusrizal (2018), essa metodologia consegue demonstrar uma melhor variação da resistência hidráulica nos resultados, justamente por ser baseada exclusivamente em variáveis físicas.

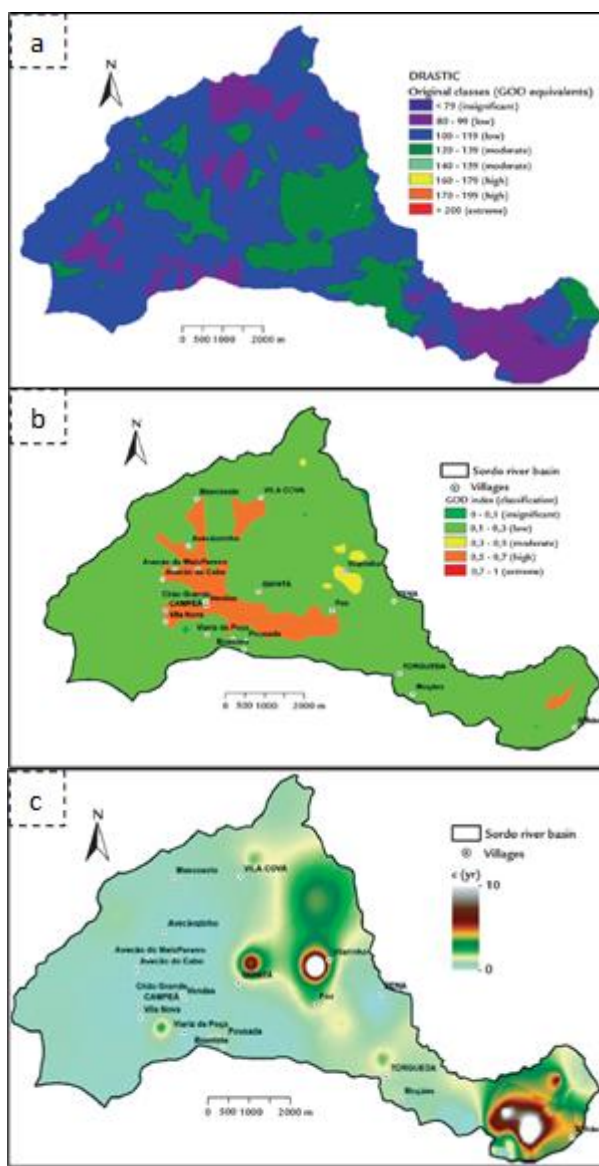


Figura 4 – Mapa de vulnerabilidade referente aos métodos (a) DRASTIC, (b) GOD e (c) AVI na bacia hidrográfica do rio Sôrdo.
Fonte: Fraga et al. (2013).

Kazakis & Voudouris (2011) utilizaram os métodos DRASTIC, AVI e GOD para o estudo da vulnerabilidade da bacia de Florina, que é um sistema constituído majoritariamente por rochas cristalinas.

Os resultados cartográficos obtidos foram semelhantes aos de Fraga *et al.* (2003), mas além disso, Kazakis & Voudouris (2011) utilizaram a análise de regressão linear para obter uma matriz de correlação linear (Tabela 8).

A matriz obtida entre as metodologias GOD e o DRASTIC apresentou valor acima de 0.5, devido a isso, é possível sugerir associação entre elas. Kazakis & Voudouris (2011) justificou esse resultado afirmando que o primeiro método utiliza três variáveis existentes na equação do segundo, e por isso, o GOD pode ser considerado uma versão simplificada do DRASTIC.

Já a matriz obtida entre as metodologias DRASTIC e AVI apresentou valor abaixo de 0.5, por isso sugere-se pouca associação entre elas. Esse resultado foi sustentado a partir da comparação entre os mapas de vulnerabilidade dessas metodologias, que apresentaram significativas diferenças quanta a delimitação das classes de vulnerabilidade.

Tabela 8 – Matriz de correlação linear das metodologias GOD, AVI e DRASTIC.

Matriz de correlação	GOD	AVI	DRASTIC
DRASTIC	0.76	0.27	1.00
AVI	0.46	1.00	
GOD	1.00		

Fonte: Kazakis & Voudouris (2011).

Outros estudiosos obtiveram resultados semelhantes aos apresentandos, como Jiménez *et al.* (2004) que utilizaram as metodologias DRASTIC, GOD, e AVI no estudo do aquífero Zaachila, no México; Ekwere *et al.* (2017) que utilizaram as mesma metodologias no estudo do aquífero Oban Massif, no Sudeste da Nigéria; Kemerich *et al.* (2020) que utilizaram as metodologias DRASTIC e GOD no estudo da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, no Brasil; e Borges *et al.* (2017) que utilizaram as metodologias DRASTIC e GOD no estudo do aquífero Serra Geral, no Brasil.

Segue abaixo quadro comparativo dispondo das principais conclusões obtidas sobre as metodologias COP, DRASTIC, GOD e AVI (Tabela 9).

Tabela 9 – Comparação entre as metodologias COP, DRASTIC, GOD e AVI.

Fonte: Autoria própria.

COMPARAÇÃO	COP	DRASTIC	GOD	AVI
Divisão de classes de vulnerabilidade	Maior	Maior	Intermediário	Menor
Confiabilidade	Alta	Alta	Intermediária	Baixa
Facilidade de aplicação	Menor	Menor	Maior	Maior
Escala de estudo	Escala de detalhe	Escala de detalhe	Escala regional	Escala regional
Hidrogeologia	Aquífero cárstico	Aquífero fissural Aquífero porosos	Aquífero fissural Aquífero porosos	Aquífero fissural Aquífero poroso
Orçamento	Maior	Maior	Menor	Menor
Parâmetros físicos	Não	Sim	Não	Sim
Parâmetros Hidrogeológicos	Sim	Sim	Sim	Não
Sistema de peso de parâmetros	Não	Sim	Não	Não

4. Considerações finais

As metodologias COP, DRASTIC, GOD e AVI são utilizadas no estudo de vulnerabilidade de aquíferos, sendo representadas a partir de resultados cartográficos que apresentam delimitações de classes de vulnerabilidade, que variam, de maneira geral, de muito baixa à extrema.

A metodologia COP foi considerada mais apropriada para o estudo de vulnerabilidade de aquíferos cársticos, já que utiliza critérios específicos para este tipo de sistema, sendo capaz de diferenciar as classes de vulnerabilidade de maneira mais realista. Todavia, devido a esta especificidade, torna-se um método inviável para outros tipos de aquíferos. Além disto, pela necessidade de muitas variáveis em seu cálculo, é melhor aplicado em escalas de detalhe e demanda um volumoso banco de dados para sua execução.

A metodologia DRASTIC foi a que obteve melhores resultados quanto a delimitação das classes de vulnerabilidade em mapas de aquíferos fissurais e porosos, justamente devido a utilização de sete variáveis físicas e hidrogeológicas. No entanto, devido a necessidade de muitos dados, foi considerada uma ferramenta com elevado custo de aplicação, mais apropriada para escalas de detalhe.

A metodologia GOD utiliza três variáveis em seus cálculos, e por isso, apresentou mapas com intermediárias delimitações de classes de vulnerabilidade quando comparado às demais metodologias. Contudo, por tratar-se de uma metodologia com uma formulação simples, foi considerada apropriada para escala regional e para estudos com limitações de dados e/ou orçamento, principalmente de aquíferos fissurais e porosos.

A metodologia AVI considera duas variáveis físicas em seus cálculos, e por isso, apresentou mapas com menores delimitações de classes de vulnerabilidade quando comparado às demais metodologias. No entanto, devido a simplicidade de sua formulação, pode ser utilizada em escalas em regionais e em estudos limitados quanto à disponibilidade de dados e/ou orçamento, principalmente de aquíferos fissurais e porosos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal da Bahia (UFBA), ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CNPq) pelo apoio à pesquisa, possibilitando o desenvolvimento de estudos ambientais.

Referências

- Abdullah, O.T.; Ali, S.S.; Al-ansari, A.N.; Knutsson, S. Assessment of groundwater vulnerability to pollution using two different vulnerability models in Halabja-Saidsadiq Basin, Iraq, *Groundwater for Sustainable Development*, v.10, 03-05, 2020.
- Albinet, M.; Margat, J. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull BRGM 2me Series*, v. 3, n.4, 13-22, 1970.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H. AND PETTY, R. J. DRASTIC. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground-water pollution potential using hydrogeological setting. Office of Research and Development. Environmental Protection, Agency USA, 1987.
- Babiker, S.I.; Mohamed, A.A.M.; Hiyama, T.; Kato, K. A GIS-based DRASTIC modiciel for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, v. 345, n.1, 127-140, 2005.
- BACHMAT, Y. & COLLIN, M. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. In: DUIJVENBOODEN, V.W.; WAEGENINGH, V.G.H. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceeding and Information. n. 38, 1987. p. 297-307.
- Borges, M.V.; Athayde, B.G.; Reginato, R.A.P. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. *Águas subterrâneas*, v.31, n.4, 327-337, 2017.
- Busico, G.; Kazakis, N.; Cuoco, E.; Colombani, N.; Tedesco, D.; Voudouris, K.; Astroicco, M. A novel hybrid method of specific vulnerability to anthropogenic pollution using multivariate statistical and regression analyses. *Water Research*, v.171, n.1, 12-13, 2019.
- Cartel, A. D., Palmer, R. C.; Monkhouse, R. A. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice, particularly with respect to nitrate. *National Institute Public Health and Environmental Hygiene*, v.3, n.1, 38, 1987.

- Cutrim, O.A.; Campos, G.E.J. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.29, n.3, 405-410, 2010.
- Ekwere, A; Edet, A. A Comparative Assessment of Vulnerability of the Oban Massif Aquifer System, SE-Nigeria, Using DRASTIC, GOD and AVI Models. *Science and International Journal of Engineering Investigations*, v.6, n.1, 68-78, 2017.
- Fraga, C.; Fernandes, L.; Pacheco, F.; Reis, C. R.; Moura, J. Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Sordo River Basin, Northeast of Portugal. *Revista Escola de Minas*, v.66, n.1, 49-58, 2013.
- FOSTER, S.S.D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden, W.V.; Waegeningh, H.G. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants* TNO Committee on hydrological research, the Hague. Proceeding and Information. n. 38, 1987. p.69-86.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. Pan American Health Organization: World health Organization, 1988. p.51.
- Guettaia, S.; Hacini, M., Boudjema, A.; Zahrouna, A. Vulnerability assessment of an aquifer in an arid environment and comparison of the applied methods: case of the mio-plio-quadernary aquifer. *Energy Procedia*, v.119, n.1, 482-489, 2017.
- HIRATA, R.C.A.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos. In: Feitosa, C.A.F.; FILHO, M.J.; FEITOSA, C.E.; DEMETRIO, A.G.L. *Hidrologia: conceitos e aplicações*, 3ª edição. Rio de Janeiro, CPRM, 2008. p.812.
- Jiménez, B.S.I.; Enriquez, C.J.; Alatorre-zamora, M.A. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*, v.4, n.3, 283-300, 2004.
- Kazakis, N.; Voudouris, K. Comparison of three applied methods of groundwater vulnerability mapping: A case study from the Florina basin, Northern Greece. *Advances in the Research of Aquatic Environment*, v.235, n.1, 361-365, 2011.
- Kemerich, C. D. P.; Martins, R.S.; Kobiyama, M.; Filho, D.V.L.L.; Borda, F.W.; Souza, B.E.E.; Fernandes, D.G. Análise da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea: comparativo entre a metodologia GOD e DRASTIC. *Revista de Geociências do Nordeste*, v.6, n.2, 45-51, 2020.
- Le grand, H. System for evaluating contamination potential for some waste sites. *American Water Work Association Journal*, v.56, n.8, p. 959-974, 1964.
- Mfonka, Z.; Ngoupayou, N.R.J.; Ndjigui, A.D.P; Kpoumie, P.D.A.; Zammouri, M.; Ngouh, A.N.; Mouncherou, F.O.; Rakotondrabe, F. GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Fouban (Western-Cameroon). *Groundwater for Sustainable Development*, v.7, n.2, 250-264, 2018.
- NOSSA, B. C.T. *Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP*. Salvador, 2018. 81-90f. Tese (doutorado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2011.
- Paula, S. M. E.; Souza, N. J. M. Sistemas de informações geográficas na análise da vulnerabilidade ambiental da bacia do rio Ceará – CE. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 63/64, n.4, p. 515-525, 2011.
- Putranto, T.; Yusrizal, S. Determining the groundwater vulnerability using the aquifer vulnerability index (AVI) in the Salatiga groundwater basin in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, v.316, 316-325, 2018.
- Oni, T.; Omosuyi, G; Akinlalu, A. Groundwater vulnerability assessment using hydrogeologic and geoelectric layer susceptibility indexing at Igbara Oke, Southwestern Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v.6, n.2, 125, 2017.
- Santos, M.G.; Pereira, S.Y. Método AVI (Aquifer Vulnerability Index) para a classificação da vulnerabilidade das águas subterrâneas na região de Campos dos Goytacazes. *Engenharia Sanitária Ambiental*, Rio de Janeiro, v.16, n.3, 281-290, 2011.

- STEMPVOORT, V.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. *A Method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada*. Groundwater na contaminant Project. Prairie Provinces Water Board, Edição 114, 1992.
- Ribeiro, M.D.; Rocha, F.W.; Garcia, V.J.A. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da Sub-bacia do Rio Siriri, Sergipe. *Revista águas subterrâneas*, v.5, n.1, 95-96, 2011.
- REBOUÇAS, C. A. Importância das águas subterrâneas. In: Feitosa, C.A.F.; FILHO, M.J.; FEITOSA, C.E.; DEMETRIO, A.G.L. *Hidrologia: conceitos e aplicações*, 3ª edição, Rio de Janeiro, CPRM, 2008. p. 13-14.
- Seller, L.; Canter, L. Summary of selected groundwater quality impact assessment methods. *NCGWR Report*, Norman, Oklahoma, USA, 142, 1980.
- Taltasse, P. Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). Universidade de São Paulo (IGc), *Publ. Avulsa*, n.1, 1972.
- Thirumalaivasan, D.; Karmegam, M.; Venugopal, K. AHP-Drastic: software for specific aquifer vulnerability assessment using drastic model and GIS. *Environmental Modelling & Software*, v.18, n.1, 645-656, 2003.
- Vías, J. M.; Andreo, B.; Perles, M. J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jiménez, P. Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. Em, Karst and Environment, *Hidrogeology Journal*, v.14, n.6, 75-83, 2002.
- Vías, J. M.; Andreo, B.; Perles, M. J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jiménez, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hidrogeology Journal*, v.14, n.1, 912-925, 2006.
- Vrba, J.; Romijn, E. Impacto of agricultural activities on groundwater. International Association of Hydrogeologists, *International Contribution to Hydrogeology*, 05, 1986.
- Yu, X.; Michael, A. H. Mechanisms, configuration typology, and vulnerability of pumping-induced seawater intrusion in heterogeneous aquifers. *Advances in Water Resources, Geophysical Research Letters*, v.46, 2553-2562, 2019.
- ZWAHLEN, F. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. European Commission COST Action 620. Directorate-General Science, Research and Development. European Commission, 2003. 297p.
- Zhong, Z.S. A discussion of groundwater vulnerability assessment methods. *Earth Sci Journal*, v.16, n.1, 12-13, 2005.

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2 – Vulnerabilidade e perigo à contaminação do sistema aquífero São Sebastião/Marizal, no município de Alagoinhas, Bahia.

Vulnerabilidade e perigo à contaminação do sistema aquífero São Sebastião/Marizal, no município de Alagoinhas, Bahia.

Vulnerability and danger to contamination of the São Sebastião/Marizal aquifer system, in the municipality of Alagoinhas, Bahia.

Maíra Sampaio da COSTA¹, Maria da Conceição RABELO² & Sérgio Augusto de Moraes NASCIMENTO³

- (¹) Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia. R. Barão de Jeremoaba s/n, Ondina, CEP 40170-290, Salvador, Ba, Brasil (mairasampaio@gmail.com).
- (²) Universidade do Estado do Pará (UEPA), AV. Hiléia, s/n, CEP 12.227-010, Marabá, Amapá, PA, Brasil (xxxx@xxx.).
- (³) Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia. R. Barão de Jeremoaba s/n, Ondina, CEP 40170-290, Salvador, Ba, Brasil (sergiomn@ufba.br).

Resumo. A contaminação de águas subterrâneas vem contribuindo para a degradação qualitativa e quantitativa de aquíferos e representa um crescente perigo para a sustentabilidade dos recursos naturais. Desta forma, esta pesquisa tem como objetivo caracterizar e avaliar a vulnerabilidade natural e o risco de contaminação do sistema aquífero Marizal/São Sebastião, no município de Alagoinhas, Bahia. Para isso foi ponderada a vulnerabilidade do sistema aplicando os métodos DRASTIC e GOD e foram identificados os contaminantes na área através do método POSH. Esses resultados foram cruzados, obtendo o mapa de potencial risco de contaminação do sistema aquífero em estudo. Os métodos de vulnerabilidade aplicados indicaram maior vulnerabilidade e perigo de contaminação no centro urbano de Alagoinhas, que correspondem zona urbana da área. Essa região é constituída predominantemente pelos arenitos da Formação Marizal, cujas características intrínsecas o tornam mais susceptíveis a contaminação. A menor vulnerabilidade e menor perigo de contaminação foram encontrados nas zonas periféricas do município, áreas constituídas predominantemente pelos arenitos e folhelhos da Formação São Sebastião. As demais regiões do município apresentaram discordância de classificação entre os métodos utilizados, no qual foi encontrado alta vulnerabilidade pelo DRASTIC e intermediária

vulnerabilidade pelo GOD, resultando em alto e intermediário perigo de contaminação, respectivamente. Por fim, diante dos resultados encontrados concluiu-se que se faz necessário, principalmente na região urbana da sede municipal, o acompanhamento da qualidade das águas subterrâneas e a orientação quanto ao uso e ocupação do solo.

Palavras-chave. DRASTIC, GOD, POSH, mapa de potencial risco de contaminação

Abstract. Groundwater contamination has contributed to the qualitative and quantitative degradation of aquifers and represents a growing danger to the sustainability of natural resources. Therefore, this research aims to characterize and evaluate the natural vulnerability and risk of contamination of the Marizal/São Sebastião aquifer system, in the municipality of Alagoinhas, Bahia. To this end, the vulnerability of the system was considered by applying the DRASTIC and GOD methods and contaminants in the area were identified using the POSH method. These results were crossed, obtaining the map of potential risk of contamination of the aquifer system under study. The vulnerability methods applied indicated greater vulnerability and danger of contamination in the urban center of Alagoinhas, which corresponds to the urban area of the area. This region is predominantly made up of sandstones from the Marizal Formation, whose intrinsic characteristics make it more susceptible to contamination. The lowest vulnerability and least danger of contamination were found in the peripheral areas of the municipality, areas predominantly made up of sandstones and shales of the São Sebastião Formation. The other regions of the municipality showed disagreement in classification between the methods used, in which high vulnerability was found by DRASTIC and intermediate vulnerability by GOD, resulting in high and intermediate danger of contamination, respectively. Finally, given the results found, it was concluded that it is necessary, especially in the urban region of the municipal headquarters, to monitor the quality of groundwater and provide guidance regarding land use and occupation..

Keywords. DRASTIC, GOD, POSH, potential contamination risk map

1 Introdução

A contaminação de águas subterrâneas representa um crescente perigo para a sustentabilidade dos recursos naturais, sendo responsável pela sua degradação qualitativa e quantitativa. A contaminação de aquíferos pode estar associada a progenitores naturais e antrópicos, apesar de que nas últimas décadas a contaminação antrópica aumentou em muitas cidades, provenientes de diferentes fontes, como o uso da terra, a urbanização, a deficiência no saneamento básico, a agricultura intensiva e o aumento geral de demandas devido ao crescente aumento da população (Kazakis & Voudouris, 2011; Ekwere & Edet, 2017).

Por isso, estudos sobre a vulnerabilidade e perigo de contaminação de aquífero se tornaram fundamentais para definir políticas de proteção dos recursos subterrâneos (Kazakis & Voudouris, 2011). A vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é reflexo das propriedades naturais dos estratos subterrâneos, ou seja, está diretamente ligada às especificidades do meio

físico. Já o potencial à contaminação refere-se a carga contaminante que é, será ou poderá ser aplicada no meio como resultado da atividade antrópica. Por fim, o risco de contaminação das águas subterrâneas pode ser definido como a interação entre a vulnerabilidade e o potencial perigo à contaminação de aquífero (Foster et al., 2006).

Esses estudos podem ser representados em forma de mapas, permitindo aos pesquisadores realizarem uma análise visual dos resultados. Além disso, os mapas contribuem para a definição de prioridades para as medidas mitigadoras e para o planejamento da proteção do aquífero e do uso da terra (Cutrim & Campos., 2010; Fraga et al., 2013).

Atualmente existem várias metodologias utilizadas para avaliar a vulnerabilidade intrínseca e o risco à contaminação de aquíferos. Dentre elas, destacam-se as ferramentas GOD (Foster, 1987) e DRASTIC (Aller et al., 1987), que foram empregadas no estudo de vulnerabilidade de aquíferos (Kazakis & Voudouris, 2011; Fraga et al., 2013; Fernandes et al., 2014; Ekwere & Edet, 2017; Benabdelouahab et al, 2018; Kemerich et al., 2020); e a ferramenta POSH (Foster et al., 2002), que foi aplicada no estudo de perigo à contaminação de aquíferos (Cutrim & Campos., 2010; Meira et al., 2014; Pinheiro et al., 2015; Vasconcelos et al., 2018).

A metodologia DRASTIC (Aller et al., 1987) proporciona uma avaliação acurada e integralizada da vulnerabilidade de um aquífero, devido ao emprego de sete parâmetros com diferentes pesos (profundidade entre a superfície e a zona saturada, recarga do aquífero, material do aquífero, solo, topografia, influência da zona não saturada e condutividade hidráulica). A metodologia GOD (Foster, 1987) proporciona uma rápida análise das condições de vulnerabilidade, por se basear em cálculos menos complexos com apenas três variáveis (tipo de aquífero, litologia e profundidade do nível da água). Por último, a ferramenta POSH (Foster et al., 2002) utiliza o uso e ocupação do solo para classificar as fontes pontuais de contaminação em três níveis quantitativos de geração de carga contaminante.

O sistema aquífero São Sebastião/Marizal, localizado no município de Alagoinhas, é a principal fonte de abastecimento da área. Isso é possível devido a permeabilidade ($1,7 \times 10^{-5}$) e transmissibilidade hidráulica (2×10^{-3}) do sistema aquífero, que favorece o acúmulo de água no meio subterrâneo e reflete na elevada vazão do mesmo (RADAM, 1999). No entanto, as características hidráulicas somadas a rasa profundidade em partes do aquífero contribuem para sua vulnerabilidade intrínseca e torna a contaminação mais propícia e perigosa (Moraes et al., 2004; Nascimento et al. 2006). Como medida mitigadora, esse estudo tem como objetivo caracterizar e avaliar a vulnerabilidade intrínseca e o perigo de contaminação do sistema aquífero

São Sebastião/Marizal, aplicado as metodologias DRASTIC (Aller et al., 1987), GOD (Foster, 1987) e POSH (Foster et al., 2002).

2 Materiais e Métodos

2.1 Localização da área

O sistema aquífero Marizal/São Sebastião representa cerca de 45% do território do município de Alagoinhas e apresenta vazão média de 51m³/h e máxima de 410 m³/h, o que configura um elevado potencial hidrogeológico (Figura 1). Além disso, essas águas foram consideradas de elevada qualidade hídrica pela bibliografia (Alves, 2015; Nascimento et al., 2016; Nascimento et al., 2021).

A Formação Marizal apresenta natureza livre, sendo constituída majoritariamente por arenitos e conglomerados, e secundariamente por siltitos, folhelhos e calcários, depositados em ambiente de leques aluviais e em sistemas fluviais entrelaçados. Essa Formação situa-se na parte superior da estratigrafia e controla a maior parte das recargas da Formação São Sebastião, conferindo uma transferência vertical de águas entre o sistema (Lima & Ribeiro, 1982).

A Formação São Sebastião apresenta natureza livre e semiconfinada. O primeiro é representado pelo Membro Rio Joanes (Membro Superior), que é constituído predominantemente por arenitos e trata-se de um reservatório de armazenamento limitado, mas que controla a recarga dos demais Membros. O segundo é representado pelos Membros Passagem dos Teixeiras e Paciência (Membros Médio e Inferior, respectivamente). Esses Membros são constituídos majoritariamente por arenitos, mas apresentam camadas intercaladas de folhelhos e siltitos, que promovem a abundante acumulação de água registrada na Formação (Leite, 1964; Lima, 1991; Nascimento et al. 2006).

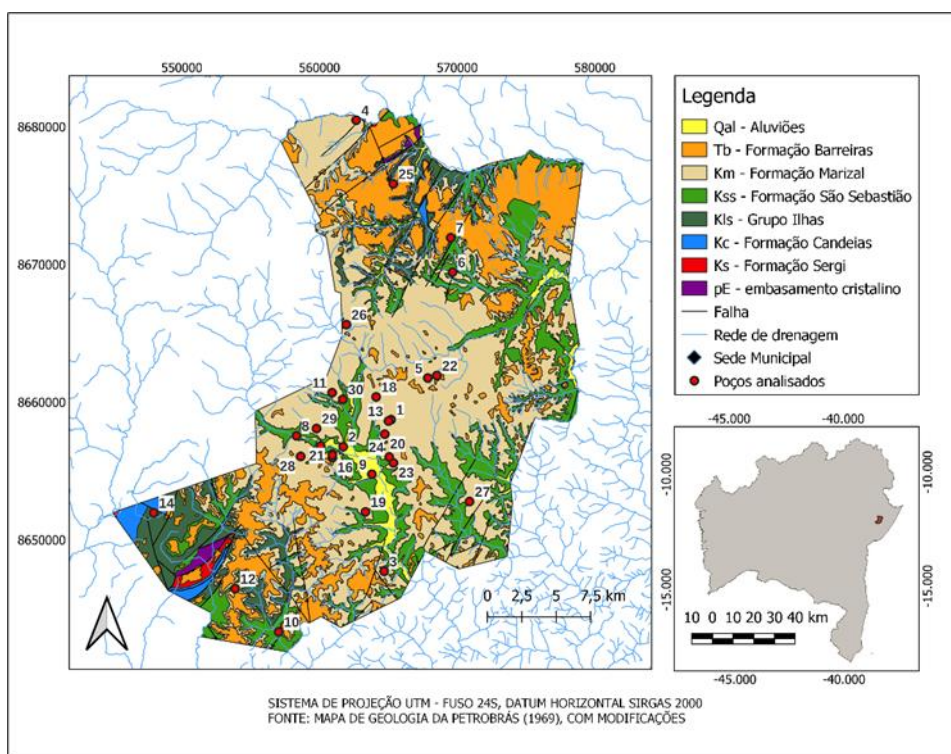


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo Fonte: Petrobrás (1969).

Figure 1. Location map of the study area Source: Petrobrás (1969)

2.2 Materiais e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida utilizando informações de 34 poços localizados no sistema aquífero Marizal/São Sebastião (Figura 1), cujos dados foram empregados para as elaborações dos: i. mapas de vulnerabilidade a partir dos métodos DRASTIC (Aller et al., 1987) e GOD (Foster, 1987); ii. mapas das potencias fontes de contaminação utilizando o método POSH (Foster et al., 2002); iii. mapas do perigo de contaminação das águas subterrâneas (Foster et al., 2002).

Os dados para os cálculos do DRASTIC (Aller et al., 1987) e do GOD (Foster, 1987) foram retirados do banco de dados do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e banco de dados do SAAE (Sistema Autônomo de Água e Esgoto de Alagoinhas). No entanto, os dados de topografia e de profundidade dos poços foram obtidos em ambiente SIG pelo programa Arcgis 10.1 e os dados de porosidade e condutividade hidráulica (C) foram obtidos a partir de estudos do RADAM BRASIL (1999).

Para o método POSH, os dados foram obtidos via satélite pelo Google Earth e em visita de campo realizado no ano de 2021 no município de Alagoinhas. Por fim, os dados de perigo de contaminação foram obtidos utilizando as informações geradas pelos demais métodos.

2.3 Método DRASTIC

Esse método é amplamente utilizado em pesquisas por avaliar detalhadamente a vulnerabilidade de aquíferos com diversas configurações hidrogeológicas (THIRUMALAIIVASAN et al., 2003). Ele utiliza sete variáveis hidrogeológicas, que são chamadas de sub-índice *i*: D (Depth) profundidade do topo do aquífero em metros; R (Recharge) recarga do aquífero em mm/ano; A (Aquifer material) tipo de material do meio aquífero; S (Soil) tipo de solo; T (Topography) topografia; I (Influence of the unsaturated zone) influência da zona não saturada do solo; e, C (Conductivity) condutividade hidráulica do aquífero em cm/seg (THIRUMALAIIVASAN et al., 2003). O peso (sub-índice *p*) de cada sub-índice *i* encontra-se na Tabela 1.

Após a análise dos sub-índices, o resultado do DRASTIC é obtido através da equação abaixo e a vulnerabilidade é classificada como: baixa (26 a 71), média (71 a 126), alta (126 a 180) e muito alta (180 a 226) (Aller et al., 1987).

$$Drastic = D_i D_p + R_i R_p + A_i A_p + S_i S_p + T_i T_p + I_i I_p + C_i C_p$$

Tabela 1. Valores e pesos atribuídos para cada sub-índice do método DRASTIC. Modificado de Aller *et al.* (1987).

Table 1. Values and weights assigned to each sub-index of the DRASTIC method. Modified from Aller *et al.* (1987).

Profundidade (m)	Valor atribuído	Peso	Condutividade hidráulica (m/s)	Valor atribuído	Peso
0 - 1.5	10	5	>81.5	10	3
1.5 - 4.5	9		40.7 – 81.5	8	
4.5 - 9	7		28.5 – 40.7	6	
9 -15	5		12.2 – 28.5	4	
15 - 22.5	3		4.1 – 12.2	2	
22.5 – 30	2		0 -4.1	1	
>30	1				
			Inclinação do relevo (%)	Valor atribuído	Peso
Recarga de aquífero (mm)	Valor atribuído	Peso	0 -1	10	1
<51	1	4	1 – 6	9	
51 -102	3		6 – 12	5	
102 - 178	6		12 – 18	3	
178 - 254	8		18	1	
> 254	9				
				Zona vadosa	Valor atribuído
Litotipo	Valor atribuído	Peso	Camada confinante	1	5
Folhelhos maciço	1 – 3	3	Silte / argila	2-6	
Ígneas metamórficas	2 – 5		Folhelho	2-5	
Ígnea metamórficas intemperizadas	3 – 5		Calcário	2-7	
Till glacial	4 – 6		Arenito	4-8	
Arenito acamadado, calcário e folhelho	5 – 9		Calcário acamadado, arenito, folhelho	4-8	
Arenito maciço	4 – 9		Areia e cascalho com significativo silte e argila	4-8	
Calcário maciço	4 – 9		Ígneas metamórficas	2-8	
Arenito e cascalho	4 – 9		Areia e cascalho	6-9	
Basalto	2 – 10		Basalto	2-8	
Calcário cárstico	9 – 10		Calcário cárstico	8-10	
Tipo de solo	Valor atribuído	Peso			
Fino ou ausente	10	2			
Cascalho	10				
Arenoso	9				
Turfoso	8				
Argila agregada e/ou contraída	7				
Marga arenosa	6				
Marga	5				
Argila margosa	3				
Lixo esterco	2				
Argila desagregada e não expansível	1				

2.4 Método GOD

Esse método é amplamente utilizado em pesquisas devido ao baixo custo, a necessidade reduzida de parâmetros hidrodinâmicos e o bom desempenho. Os fatores utilizados nos cálculos são: Tipo de Aquífero (G); Litologia e Grau de Consolidação da Zona Vadosa ou Camadas Confinantes (O); e Profundidade do nível d'água ou da base confinante do aquífero (D). Estes fatores possuem o mesmo peso e seus valores variam entre 0 e 1.

O produto dos fatores ($GOD = G \times O \times D$) determina o índice de vulnerabilidade do aquífero, que estabelece a vulnerabilidade do aquífero como insignificante, baixa, média, alta e extrema, conforme Figura 2.

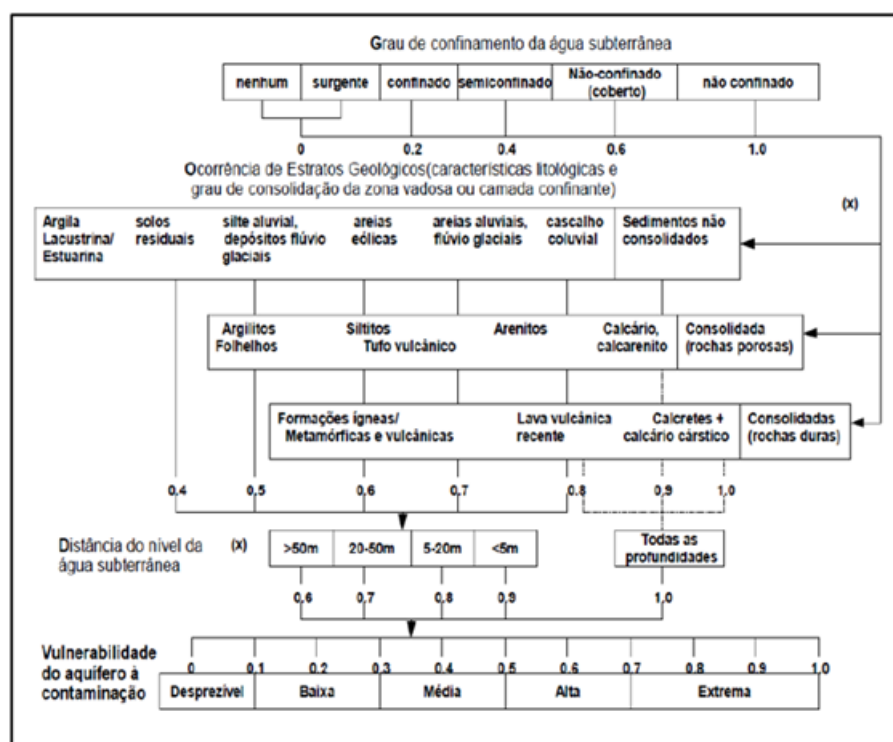


Figura 2. Valores atribuídos para cada fator e classificação quanto a vulnerabilidade pelo método GOD. Adaptado de Foster (1987).

Figure 2. Values assigned to each factor and classification regarding vulnerability using the GOD method. Adapted from Foster (1987).

2.5 Método POSH

Esse método classificou as atividades capazes de gerar contaminantes e cargas hidráulicas associadas, sendo representado na forma de mapa, utilizando os critérios estabelecidos por Foster et al (2002) que divide as fontes contaminantes em três índices qualitativos: reduzida, moderada e elevada (Tabela 2).

A partir da caracterização das potenciais fontes, o mapeamento do perigo de contaminação ocorreu em ambiente SIG com base na multiplicação da vulnerabilidade (estabelecido pelo DRASTIC e pelo GOD) com a classificação das cargas poluidoras (estabelecido pelo método POSH). Para isso, foram determinados pesos para os índices de vulnerabilidade, no qual a alta vulnerabilidade recebeu peso 3, moderada vulnerabilidade recebeu peso 2 e baixa vulnerabilidade recebeu peso 1 (Moura, 2014). Após a multiplicação, os índices do perigo de contaminação variaram entre 1 e 9 e foram classificados como baixo (resultados entre 1 e 3), moderado (resultados entre 3,1 e 5) e elevado (resultados entre 5,1 e 9). O recorte de valores foi estabelecido a partir do gráfico de histograma fornecido pelo Arcgis 10.1, que se utilizando da frequência dos dados estabeleceu os intervalos elencados acima.

Tabela 2. Níveis qualitativos de potencial de contaminação das atividades.

Table 2. Qualitative levels of contamination potential of activities.

Atividades contaminantes	Potencial de contaminação
Cemitério	Reduzido
Posto de Gasolina	Moderado
Indústria de Curtume	Elevado
Resíduos do curtume	Elevado
Lagoas de tratamento de curtume	Elevado
Pasto extensivo	Reduzido
Rede de esgoto inferior a 25% com densidade demográfica inferior a 550	Elevado
Rede de esgoto superior a 75% com densidade demográfica inferior a 550	Reduzido
Monocultura	Elevado
Pastagem intensiva	Elevado
Esgoto residencial (Área >5 HÁ)	Moderado
Águas residuais residenciais	Reduzido
Lixão	Elevado
Poços abandonados	Elevado
Lagoas de infiltração	Elevado
Lavagem de veículo	Reduzido
Zona Urbana	Moderado
Indústria de Mármore e Granitos	Reduzido
Indústria Florestal	Elevado
Indústria Têxtil	Moderado

Indústria de Cerâmica	Reduzido
Indústria de Charutos	Reduzido
Indústria de bebidas	Reduzido
Frigorífero	Reduzido
Indústria de produtos químicos	Elevado
Indústria de Gás	Elevado
Indústria de telhas	Reduzido
Fábrica de Calçados	Moderado

3 Resultados e Discussões

3.1. *Classificação do potencial de contaminação*

As atividades com potencial de carga contaminante se concentram principalmente na região central do mapa, correspondente a zona urbana da sede do município de Alagoinhas (Figura 3). Essas atividades estão associadas a presença de cemitério, esgoto residencial e urbano, postos de gasolina, lavagens de veículo, lagoas de infiltração e poços abandonados, cujo potencial de contaminação encontra-se explicitado na Tabela 2. Além disso, o lixão do município, que possui elevado potencial de contaminação do aquífero subterrâneo encontra-se próximo a zona urbana. Estudos já sugerem que a proximidade de residências a depósitos de resíduos sólidos apresenta efeito direto na saúde populacional, podendo ser precursor de doenças graves como câncer (Gouveia & Prado, 2010).

A zona rural do município mostrou significativa redução de atividades com potencial de carga contaminação, contudo, as atividades que são realizadas (monocultura de eucaliptos e esgotos residenciais) apresentam respectivamente elevado e moderado potencial de contaminação.

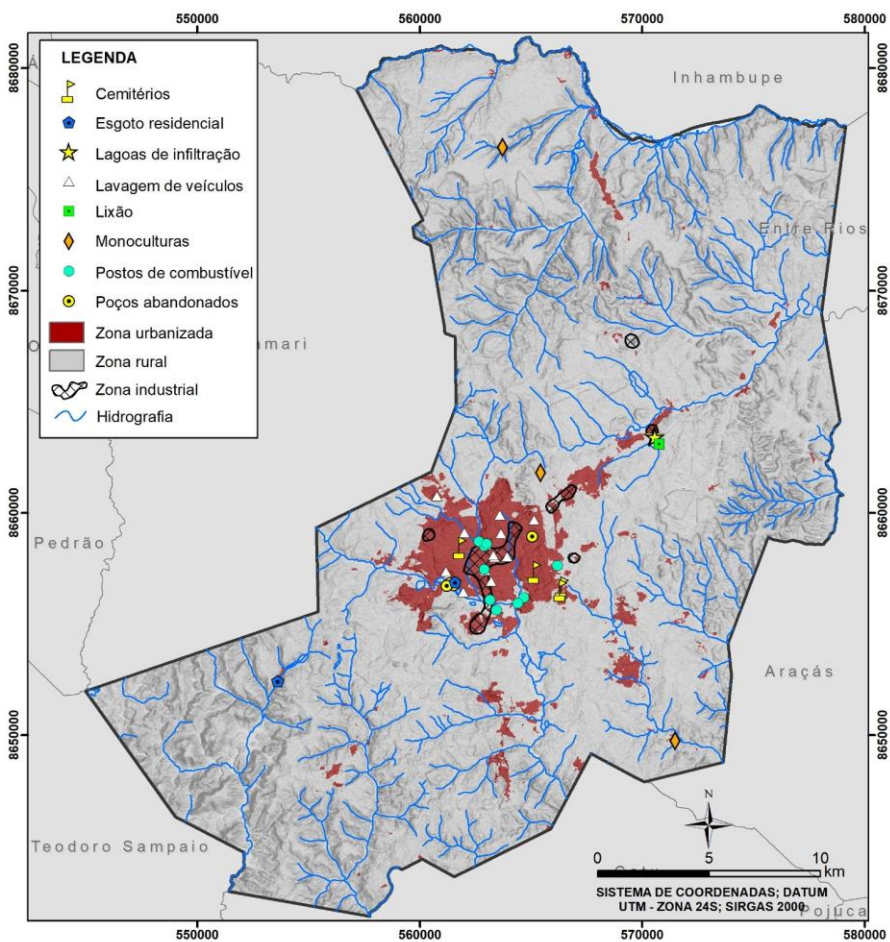


Figura 3. Potencial de contaminação do município de Alagoinhas, a partir dos critérios estabelecidos por Foster *et al* (2002).

Figure 3. Dangers of contamination in the municipality of Alagoinhas, based on the criteria established by Foster *et al* (2002).

3.2 Método GOD

Utilizando como critério o sistema de avaliação GOD (Figura 4), para o parâmetro G, responsável por caracterizar o tipo de aquífero, o Marizal foi classificado como não confinado, devido ao seu caráter livre e nível freático raso. Já o aquífero São Sebastião, dado as diferentes configurações hidrogeológicas, foi classificado como três caracteres distintos: livre, semiconfinado e confinado.

Para o parâmetro O, que representa a litologia e consolidação da zona vadosa, o aquífero Marizal recebeu a classificação de areias aluviais e fluvioglaciais e cascalho de leques aluviais e a Formação São Sebastião foi classificada como areias eólicas. Por fim, o parâmetro D, que é

caracteriza a profundidade do nível d'água, indicou que a média do nível estático para as duas Formações variando entre 5 e 20 metros.

Os cálculos finais indicam vulnerabilidade que varia de baixa a alta na área. A vulnerabilidade alta representou 19,25% da área de estudo e se encontra principalmente na região central e nas regiões periféricas do município, que são formadas predominantemente pela Formação Marizal, classificada como areais aluviais e fluvioglaciais e cascalho de leques aluviais. O centro da área equivale a zona urbana do mapa, o qual sofre influência de níveis estáticos rasos (<5m de profundidade), enquanto as zonas periféricas apresentaram nível estático de baixo a médio, entre 5 e 20 m. Os poços que apresentaram os mais elevados índices de vulnerabilidade foram: P-02, P-03, P-06, P-08, P-13, P-14, P-15 e P-25.

As médias vulnerabilidades ocuparam a maior parte da área de estudo (71,35%) e foram principalmente correlacionados a Formação Marizal. Essa região foi também classificada como areais aluviais e fluvioglaciais e cascalho de leques aluviais, contudo apresentou níveis estáticos intermediários, com valores de até 52,5m, o que refletiu no resultado de vulnerabilidade obtido.

As baixas vulnerabilidade ocuparam 9,4% da área de estudo, localizadas no centro e nas zonas periféricas do município, onde o aquífero Formação São Sebastião predomina. Essa Formação foi classificada como areias eólicas com nível estático intermediário, atingindo até 51m. Além disso, os resultados encontrados associam-se a configuração hidrogeológica semiconfinada da Formação, em que os folhelhos e argilitos promovem uma barreira natural ao meio, dificultando a passagem de contaminação para o sistema subterrâneo.

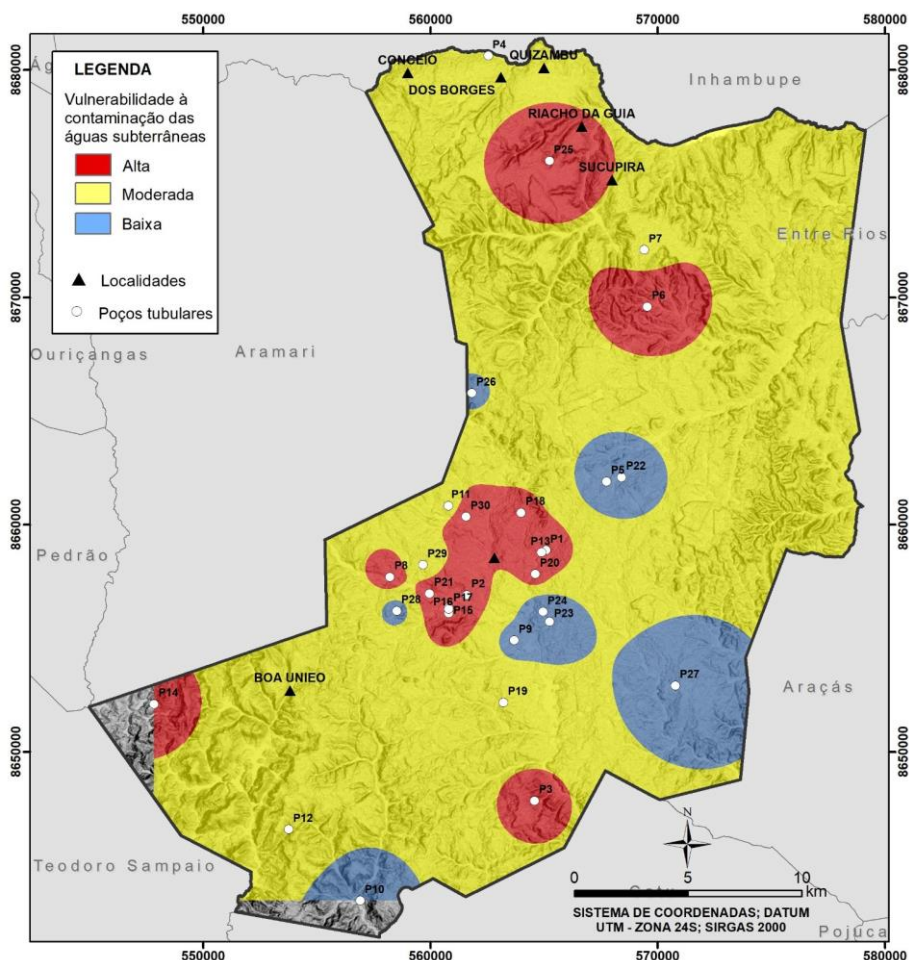


Figura 4. Mapa de vulnerabilidade do município de Alagoinhas, utilizando método GOD estabelecido por Foster (1987).

Figure 4. Vulnerability map of the municipality of Alagoinhas, using the GOD method established by Foster (1987).

3.2. Perigo de contaminação

Considerando os resultados de vulnerabilidade estabelecidos pelo método GOD, a área de estudo exibiu predominância de áreas com baixo e moderado potencial de risco de contaminação do sistema aquífero, correspondendo respectivamente a 32% e 60% da área do mapa. Essas regiões correspondem a zona rural do município de Alagoinhas, no qual poucas atividades poluidoras estão estabelecidas (Figura 5).

O elevado perigo de contaminação foi identificado na área central do município, que corresponde a zona urbana, e em pontos isolados da zona periférica, correspondendo a 8% do

total da área. Para a zona urbana, a vulnerabilidade elevada encontrada, acompanhada de notória concentração de atividades poluidoras, incluindo a zona industrial (Figura 3), corroboram para o elevado perigo de contaminação identificado. A partir desse resultado, aconselha-se que sejam impostas restrições mais rígidas quanto a implementação de novas atividades antrópicas na região, além de acompanhamento das existentes. Para as zonas periféricas que apresentaram elevado perigo de contaminação, o resultado encontrado se associa a atividades contaminantes pontuais identificadas nas regiões (Figura 3), como monocultura e poços abandonados, e a elevada vulnerabilidade identificada, proveniente das características hidrogeológicas da Formação Marizal.

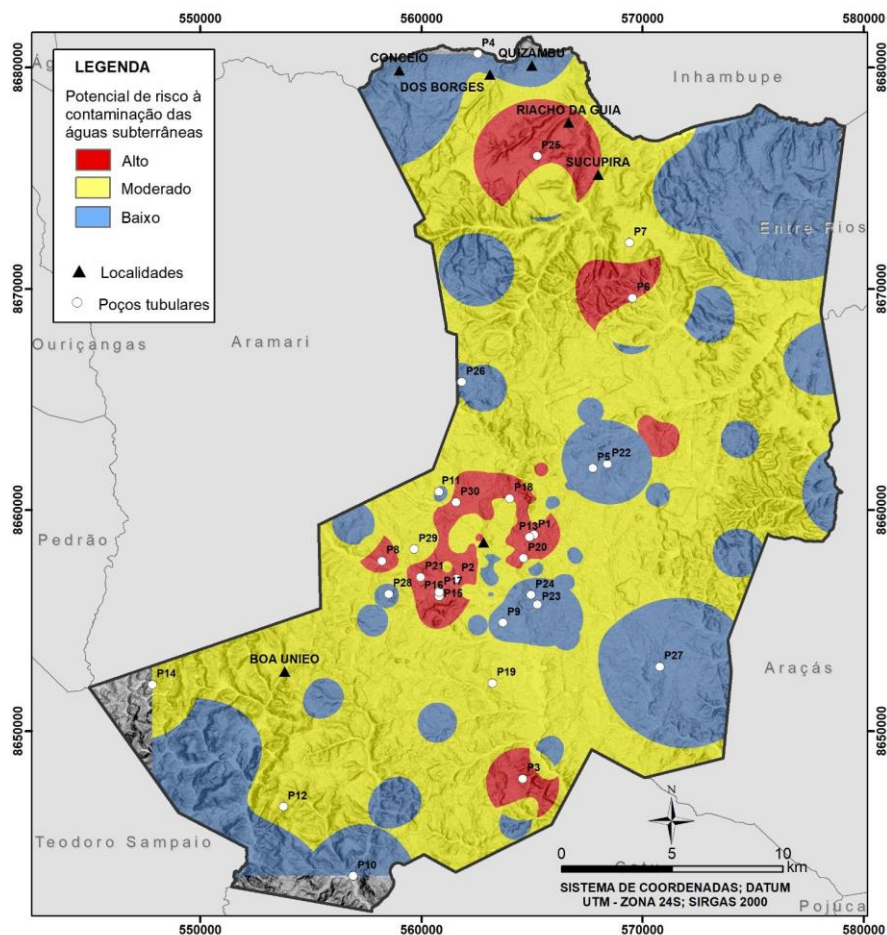


Figura 5. Mapa de perigo de contaminação de Alagoínhas, a partir dos critérios estabelecidos por Foster *et al* (2002).

Figure 5. Contamination hazard map of Alagoínhas, based on the criteria established by Foster *et al* (2002).

3.3. Método DRASTIC

Utilizando como critério os parâmetros vinculados ao método DRASTIC (Figura 6), a profundidade do nível estático (D) foi segmentada em 7 classes, com a Formação Marizal veiculada a menores profundidades (< 1,5m e <1,5-15m) e a Formação São Sebastião aos as maiores profundidades (15-30m e >30m). O parâmetro recarga (R), que foi estimado a partir da porosidade e variação do nível estático dos poços em estudo, apresentou 2 classes distintas para os aquíferos São Sebastião e Marizal, com recarga de 550mm e 217 mm, respectivamente.

O parâmetro (A) referente a litologia do aquífero foi segmentado em 4 classes, no qual o Aquífero Marizal representou 2 delas, sendo correlacionado principalmente aos arenitos maciços com grande variedade granulométrica e faciológica, e o Aquífero São Sebastião foi associado as outras 2 classes, cuja classificação principal aplicada caracteriza-se pela sucessão finamente acamadadas de arenitos e folhelhos.

O tipo de solo (S) foi diferenciado em 2 classes, no qual os solos do tipo latossolo, vertissolo e argissolo foram agrupados devido a maior presença de argila; e o neossolo quartzênico presente na área foi individualizado devido a maior presença arenosa.

O parâmetro (T) referente a declividade do terreno foi dividido em 4 classes, no qual a área de estudo apresenta significativa variação de inclinação do terreno, apresentando menores valores (entre 0 e 2% e entre 2 - 6%) na porção oeste da área e maiores valores (entre 6 – 12 e 12 – 18%) na porção leste da área.

O parâmetro (I), responsável pelo impacto da zona vadosa, foi dividido em 4 segmentos, em que a Formação Marizal foi associada principalmente aos arenitos e cascalhos com teor significativo de silte e argila e a Formação São Sebastião foi correlacionada aos arenitos e aos arenitos e folhelhos acamadados.

O último parâmetro (C), responsável por caracterizar a condutividade hidráulica, foi dividido em 2 classes a partir dos estudos de Peixinho (2016), que indicou a condutividade hidráulica da Formação Marizal igual a $6,52 \times 10^{-4}$ m/s e da Formação São Sebastião igual a $1,7 \times 10^{-5}$ m/s, resultando em agrupamentos distintos.

Os cálculos finais indicaram que a vulnerabilidade varia de alta (85%) a média (15%) na área de estudo. As áreas de alta vulnerabilidade representam 85%, ocupando a maior extensão do mapa e ultrapassando a região delimitada pelo método GOD para esse critério. Os poços que apresentaram os mais elevados níveis de vulnerabilidade foram: P-01, P-02, P-06, P-13, P-15, P-14, P-16, P-17, P-18, P-31 e P-33. A litologia predominantemente nessa região são

arenitos maciços da Formação Marizal, com média de recarga de 217mm e menores níveis estáticos (< 1,5m e <1,5-15m), coincidindo com os resultados obtidos para alta vulnerabilidade pelo método GOD.

A seção do mapa com média vulnerabilidade condiz com 15% da área e situa-se nas porções das zonas rurais de Alagoinhas, correspondendo a região periférica do município. Nessas áreas ocorrem a predominância de arenitos e folhelhos correlatas a Formação São Sebastião, que apresentam baixa condutividade hidráulica (1.7×10^{-5} m/s) e elevados valores de recarga (média igual 550mm) e níveis estáticos (15-30m e >30m), o que contribuiu para a média vulnerabilidade intrínseca encontrada.

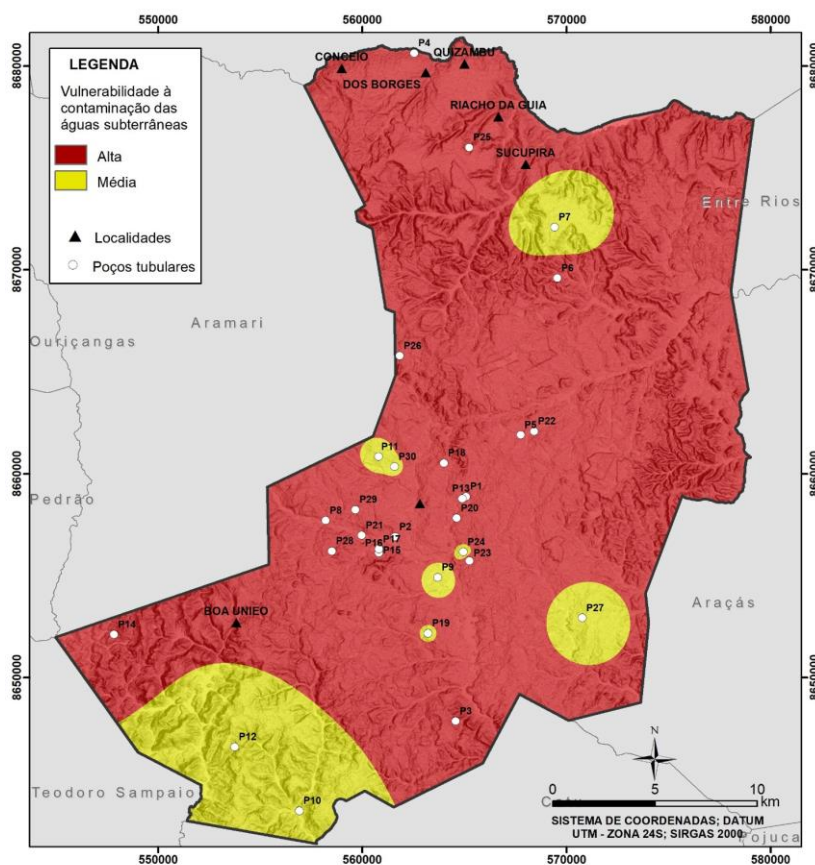


Figura 6. Mapa de vulnerabilidade de Alagoinhas utilizando o método DRASTIC estabelecido por Thirumalaivasan *et al.* (2003).

Figure 6. Vulnerability map of Alagoinhas using the DRASTIC method established by Thirumalaivasan et al. (2003).

3.4. Perigo de contaminação DRASTIC

Considerando os resultados de vulnerabilidade estabelecidos pelo método DRASTIC, a área de estudo apresentou predominância de elevado perigo de contaminação (44% da área) (Figura 7), associado principalmente a região central e norte do território. Para a zona norte, a litologia predominante são arenitos maciços da Formação Marizal, que apresentam níveis estáticos menos profundos ($< 1,5\text{m}$ e $<1,5\text{-}15\text{m}$), baixa recarga (217 mm) e maior condutividade hidráulica ($6,52 \times 10^{-4}$ m/s), colaborando, em geral, para o nível de perigo encontrado. Além disso, nessa área ocorre o cultivo de monoculturas de eucalipto e pequenas zonas de moradia que colaboram para o resultado obtido. Para a região central, além das características hidrogeológicas, a presença da zona urbana da sede, que engloba a zona industrial, os postos de gasolina, o cemitério, entre outras fontes de contaminação (Figura 3), representam contribuições relevantes para o perigo de contaminação da área.

O médio perigo de contaminação representa 51% da área de estudo e está principalmente relacionado aos arenitos e folhelhos acamadados da Formação São Sebastião, que apresentam elevada profundidade dos níveis estáticos (15-30m e $>30\text{m}$), elevada recarga (550mm) e baixa condutividade hidráulica (1.7×10^{-5} m/s). Contudo, nessa área ocorrem pequenas zonas urbanas e cultivo de monocultura, colaborando para o perigo de contaminação da região.

Por fim, o baixo perigo de contaminação representou 5% da área, ocupando a menor porção do território. Esse resultado pode ser correlacionado a ausência de atividades potencialmente poluidoras na área; e aos arenitos e os folhelhos acamadados da Formação São Sebastião, em que as características intrínsecas como elevada profundidade dos níveis estáticos, elevada recarga e baixa condutividade hidráulica colaboram para a baixa vulnerabilidade da área e, consecutivamente, para o baixo perigo de contaminação.

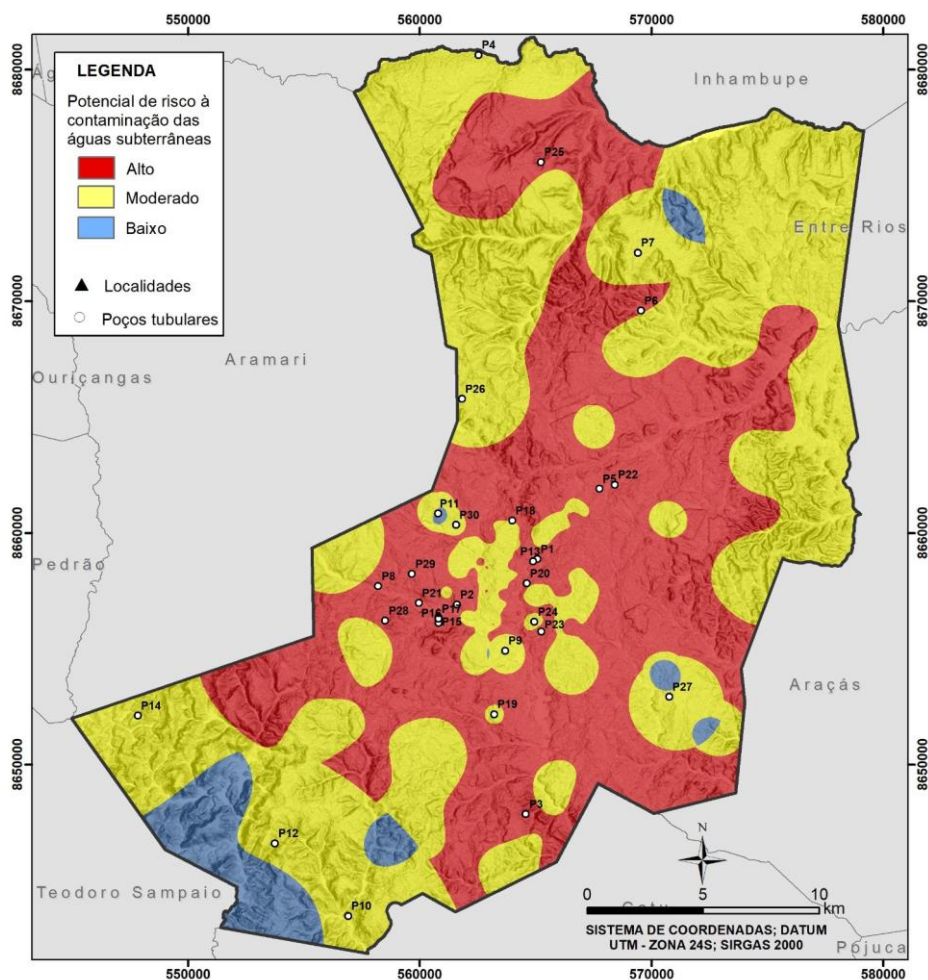


Figura 7. Mapa de perigo de contaminação de Alagoínhas, a partir dos critérios estabelecidos por Foster *et al* (2002).

Figure 7. Contamination hazard map of Alagoínhas, based on the criteria established by Foster *et al* (2002).

4 Conclusões

A influência composicional do sistema aquífero Marizal/São Sebastião para os níveis de vulnerabilidade encontrada é notória nos dois métodos de vulnerabilidade aplicados (DRASTIC e GOD), no qual os arenitos da Formação Marizal, cujas características intrínsecas são mais suscetíveis a contaminação, contribuem para regiões mais vulneráveis; e a Formação São Sebastião, constituída de folhelhos intercalados aos arenitos, proporciona menor vulnerabilidade para as áreas associadas.

Os resultados dos métodos de vulnerabilidade coincidiram na região central da zona urbana do município de Alagoinhas, no qual a alta vulnerabilidade obtida correlaciona-se a predominância litológica dos arenitos da Formação Marizal. Além disso, essa área sedia as principais fontes de contaminação do município, resultando em alto perigo de contaminação do centro urbano da área.

Para o método DRASTIC, a alta vulnerabilidade não se restringiu ao centro urbano, se espalhando pela maior parte da área de estudo. Os resultados obtidos associam-se a maior presença da Formação Marizal nos poços estudados. Para essa área, as regiões em que foram identificados cultivo de monoculturas de eucaliptos e zonas de moradia foram classificadas como alto perigo de contaminação.

Para o método GOD, a maior parte da área foi identificada como vulnerabilidade intermediária, se associado predominantemente com os arenitos da Formação Marizal. Nessas regiões, devido à pouca existência de atividade potencialmente contaminantes, o perigo de contaminação também foi classificado como intermediário.

Por fim, as regiões periféricas do mapa, que correspondem a zona rural de Alagoinhas, apresentaram baixa à intermediária vulnerabilidade. Essas áreas são constituídas predominantemente pelos arenitos e folhelhos da Formação São Sebastião, cujas características composicionais contribuem para uma menor susceptibilidade à contaminação subterrânea. Além disso, são áreas que apresentaram poucas atividades contaminantes, o que contribuiu para o intermediário à baixo perigo de contaminação encontrado.

Mediante os resultados encontrados, principalmente na região urbana da sede municipal de Alagoinhas, se faz necessário a execução de medidas preventivas de fiscalização, cujo foco seja o monitoramento da qualidade da água subterrânea. Espera-se que este trabalho contribua para a orientação do uso e ocupação do solo e contribua para a manutenção da qualidade das águas do sistema Aquífero Marizal /São Sebastião, que representa uma importa fonte de abastecimento para a região

Agradecimentos. Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia (UFBA), ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA), a SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Alagoinhas) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CNPq) pelo apoio financeiro à essa pesquisa.

Referências bibliográficas

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. & Petty, R. J. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground-water pollution potential using hydrogeological setting. In: MATEC WEB OF CONFERENCES, Office of Research and Development. Environmental Protection, 7., 1987, Agency USA. Anis... USA.
- Alves, J.E. 2015. Estudo hidrogeoquímico comparativo entre os membros da Formação São Sebastião, Recôncavo Norte – BA. Salvador, 36-40p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- Benabdelouahab, S., Salhi, A., Himi, M., Messari, E.S.E.J., Ponsati, C.A., Mesmoudi, H. & Benabdelfadel, 2018. A. Using resistivity methods to characterize the geometry and assess groundwater vulnerability of a Moroccan coastal aquifer. *Groundwater for Sustainable Development*, 7(1): 293-304.
- Cutrim, O.A. & Campos, G.E.J. 2010. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 29 (3, 405-410).
- Ekwere, A. & Edet, A. 2017. A Comparative Assessment of Vulnerability of the Oban Massif Aquifer System, SE-Nigeria, Using DRASTIC, GOD and AVI Models. *Science and International Journal of Engineering Investigations* 6 (1): 68-78.
- Fernandes, S. F. L., Queirós, R. V. L., Pacheco, L.A.F., Pacheco, L.A.F., Leitão, S. & Moura, P.J. 2014. DRASTIC and GOD vulnerability maps of the Cabril River Basin, Portugal. *Revista Escola de Minas*, 67(2): 133-142.
- Fraga, C., Fernandes, L., Pacheco, F., Reis, C. R. & Moura, J. 2013. Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Sordo River Basin, Northeast of Portugal. *Revista Escola de Minas*, 66(1): 49-58.
- Foster, .S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden, W.V., Waegeningh, H.G. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. TNO COMMITTEE ON HYDROLOGICAL RESEARCH*, 1987, Proceeding and Information. n. 38, p.69-86.

- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. 2002. Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies. USA, Municipal Authorities and Environment Agencies, World Bank, GWMATE: Washington, 101p.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'elia, M.; Paris, M. 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais, São Paulo: Servemar.
- Gouveia, N., Prado, R.R. 2010. Riscos à saúde em áreas próximas a aterros de resíduos sólidos urbanos. *Revista Saúde Pública*, 44(5):859-66.
- Kazakis, N., Voudouris, K. 2011. Comparison of three applied methods of groundwater vulnerability mapping: A case study from the Florina basin, Northern Greece. *Advances in the Research of Aquatic Environment*, 235 (1): 361-365.
- Kemerich, P.D.C., Martins, S. R., Kobiyama, M., Descovi Filho, L. L. V., Borba, W. F. de., Souza, E. E. B. & Fernandes, G. D. 2020. Análise da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea: comparativo entre a metodologia GOD e DRASTIC. *Revista de Geociências do Nordeste*, 6 (2): 45–53.
- Leite, D. C. 1964. Possibilidade de água subterrânea na Bacia do Recôncavo Baiano. *Rel Int. Petrobrás*, Salvador-BA.
- Lima, O. A. L. 1991. Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero Recôncavo na região de Camaçari - Dias D'Ávila. Tese Prof. Titular, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Lima, O. A. L. de., Ribeiro, C. 1982. Caracterização hidrogeológica do aquífero São Sebastião na área de captação do CIA-BA. *Revista Brasileira de Geofísica*, 1(1) 11-22.
- Meira, J. C. R., Campos, A. B. & Pereira Júnior, L. C. 2014. Vulnerabilidade natural e perigo à contaminação de zona de recarga do Aquífero Guarani. *Águas Subterrâneas*, 28 (1): 31 – 46.
- Moraes, S.R.L., Silva, J.B., Luz, D.L., Rêgo, M.J.M., Carvalho, F.M., Machado, L.N., Lima, L.A.O., Machado, L.S., Nascimento, S.A.M., Filho, A.S.S., Orrico, M.R.S., Zanta, M.V., Pereira, A.P., Santana, A.V.A., Sant'anna, M.A., Sobrinho, S.G.D., Cairo, C.F.I., Matos, T.C.C.J., Rocha, B.M., Pereira, S.O & Santana, A.R., Silva, S.S. 2004. Plano Municipal de Saneamento ambiental de Alagoinhas. Salvador, Bahia, 2v., I tomo, 256-159p.

- Moura, P. 2014. Vulnerabilidade de aquíferos: usos dos métodos DRASTIC e GOD na porção Norte do complexo industrial e portuário do Pecém, Estado do Ceará, 32-11p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Ceará.
- Nascimento, S.A.M., Leal, B.R.L., Purificação, C.G.C. 2016. A utilização da análise de variância (ANOVA) na distinção de Aquíferos Sedimentares na região do Recôncavo Norte, Estado da Bahia. *Águas Subterrâneas*, 30 (3): 411-426.
- Nascimento, S.A.M., Moraes, S. R.L. & Santana, A.V.A. 2006. Estudo quali-quantitativo das águas subterrâneas no Município de Alagoinhas-Bahia como componente do Plano Municipal de Saneamento Ambiental. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba, Anais... Curitiba, *Águas Subterrâneas*.
- Nascimento, F. J. de S. C., Barroso, A. de A. F., Santos, H. de O. R. dos., & Lima, P. de F. 2021. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas da microrregião do Baixo Jaguaribe, Ceará, Brasil, *Águas Subterrâneas*, 35(1):01-02.
- Peixinho, L.A.M. 2016. Hidrogeologia do sistema aquífero Marizal / São Sebastião na Sub-bacia do Tucano Central, Estado da Bahia. Salvador, 119-120p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- Pinheiro, B.J.R.; Rauber, C.C.A.; Nummer, V.A.; Silva, S.L.J. 2015. Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria RS. *Revista de Gestão de água da América Latina*, 12 (2): 61-79.
- RADAMBRASIL. Folha SD.24 Salvador. Potencial dos Recursos Hídricos. Levantamento de Recursos Naturais, suplemento, 14(1): 45-46.
- Thirumalaivasan, D., Karmegam, M., Venugopal, K. 2003. AHP-Drastic: software for specific aquifer vulnerability assessment using drastic model and GIS. *Environmental Modelling & Software*, 18 (1): 645-656.
- Vasconcelos, B.M., Melo, G.J., Demetrio, A. G.J. & Alves, S.R. 2018. Avaliação do Potencial Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas na Zona Norte de Natal, RN. *Revista de Gestão de água da América Latina*, 15 (13): 05-10.

CAPÍTULO 4

ARTIGO 3 – Subsídio para o Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Marizal/São Sebastião, Alagoinhas-Bahia

Contribution to the Groundwater Quality Monitoring of the Marizal/São Sebastião Aquifer System, Alagoinhas-Bahia, Brazil

Subsídio para o Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Marizal/São Sebastião, Alagoinhas-Bahia

Abstract

Marizal/São Sebastião aquifer system is the main water supply of the municipality of Alagoinhas (State of Bahia). However, anthropic interventions contribute to soil and groundwater pollution which increases the need for related research. Multivariate statistical analysis is a widely used tool, helping in the investigation of groundwater quality while being capable of simultaneously evaluating diverse variables of a sample set. In this study, two methodologies were applied: factor analysis and multivariate cluster analysis. Ten of the most influential variables for groundwater quality were selected and then grouped into two factors. First factor identified electrical conductivity, salinity, calcium, chloride, sulfate, manganese, and iron, which are indicators of water salinity. Second factor identified pH, bicarbonate, and phosphate, indicating anthropic interventions and alkalinity in the environment. Multivariate cluster analysis was applied to the parameters of the two factors, resulting in dendrograms with four clusters. The present study showed that the multivariate statistical analysis is an efficient tool for monitoring and can contribute to the management of groundwater quality.

Keywords: Sedimentary aquifer; Factor analysis; Cluster analysis

Resumo

O sistema aquífero Marizal/São Sebastião é a principal fonte de água do município de Alagoinhas (Estado da Bahia). Entretanto, as intervenções antrópicas podem contribuir para a poluição do solo e das águas subterrâneas, elevando a necessidade de pesquisas sobre o tema. Uma ferramenta amplamente utilizada para auxiliar na investigação da qualidade das águas é a análise estatística multivariada, que é capaz de avaliar simultaneamente diversas variáveis de um conjunto amostral. Neste estudo foram aplicadas duas metodologias, a análise fatorial e a análise de agrupamento multivariada. Foram selecionadas as dez variáveis mais influentes para a qualidade das águas subterrâneas e agrupadas em dois fatores. O primeiro fator potencializou condutividade elétrica, salinidade, cálcio, cloreto, sulfato, manganês e ferro, que são indicadores de salinidade na água. O segundo fator potencializou pH, bicarbonato e fosfatos, que são indicadores de alcalinidade do meio e atividades antrópicas. A análise de agrupamento multivariada foi aplicada nos parâmetros dos dois fatores, apresentando como resultado

dendrogramas com formação de quatro grupos. Esse estudo mostrou que a análise estatística multivariada é uma ferramenta eficaz no monitoramento e pode contribuir na gestão da qualidade das águas subterrâneas.

Palavras-chave: Aquífero sedimentar; Análise fatorial; Análise de agrupamento

1 Introdução

O sistema aquífero Marizal/São Sebastião apresenta elevado potencial hidrogeológico, representando a principal fonte de abastecimento do município de Alagoinhas (Moraes et al. 2004; Nascimento et al. 2006). Entretanto, a ocupação urbana e rural contribui para a poluição dos solos e das águas subterrâneas, mobilizando pesquisadores de diferentes campos do conhecimento a trabalhar com metodologias capazes de caracterizar quantitativamente e qualitativamente o ambiente hidrogeológico. De modo geral, esses estudos possibilitam uma melhor gestão dos recursos hídricos e do uso e ocupação do solo.

Neste viés, uma ferramenta amplamente utilizada é a análise estatística multivariada, que se trata de um conjunto de procedimentos estatísticos apto a avaliar simultaneamente diversas variáveis de um conjunto amostral, sendo capaz de agrupar e associar componentes similares, investigar a dependência entre elas e construir testes de hipóteses (Vicini 2005; Ferreira 1996).

No estudo sobre a similaridade entre variáveis existem duas metodologias que se destacam: a análise fatorial utilizando análise de componentes principais e a análise de agrupamento hierárquico. A primeira análise permite reduzir um número de variáveis originais a um conjunto menor de variáveis (fatores), com perda mínima de informações; a segunda análise agrupa um conjunto de amostras utilizando como critério à similaridade entre elas.

Por meio da análise multivariada é possível selecionar os parâmetros que melhor caracterizam a água subterrânea e definir as características físico-químicas que deverão ser monitoradas, reduzindo os custos com análises menos relevantes. Neste contexto, Santana & Pezente 2017; Gomes & Cavalcante 2017; Gomes & Franca 2019; Costa et al. 2020, entre outros, empregaram essa ferramenta como suporte para a gestão das águas subterrâneas, principalmente em regiões semiáridas, como a área de estudo, que são de alta vulnerabilidade socioambiental.

Assim, o objetivo dessa pesquisa foi aplicar a análise estatística multivariada para subsidiar no monitoramento da qualidade da água subterrânea do sistema aquífero Marizal / São Sebastião no município de Alagoinhas, Bahia.

1.1 Caracterização geológica

A área de estudo está inserida na Bacia Sedimentar do Recôncavo Norte, envolvendo o sistema aquífero Marizal/São Sebastião localizado no município de Alagoinhas, Bahia (Figura 1). A porção do aquífero representado pela Formação Marizal (Km) apresenta caráter livre e é constituída majoritariamente por arenitos e conglomerados, e secundariamente por siltitos, folhelhos e calcários, depositados em ambiente de leques aluviais e em sistemas fluviais entrelaçados (Ribeiro 2008; Nascimento & Alves 2014).

A fração do aquífero representada pela Formação São Sebastião (Kss) apresenta natureza livre e semi-confinada, e é dividida em três membros: Rio Joanes (membro superior), Passagem dos Teixeiras (membro médio) e Paciência (membro inferior). Essa Formação é constituída por arenitos cinza-amarelados, róseos e amarelo-avermelhados, com granulometria variando entre fina, média e grosseira. Os arenitos são maciços, apresentam geometria tabular e estratificação plano-paralela de baixo ângulo e/ou cruzadas acanaladas (Nascimento & Alves 2014; Alves 2015).

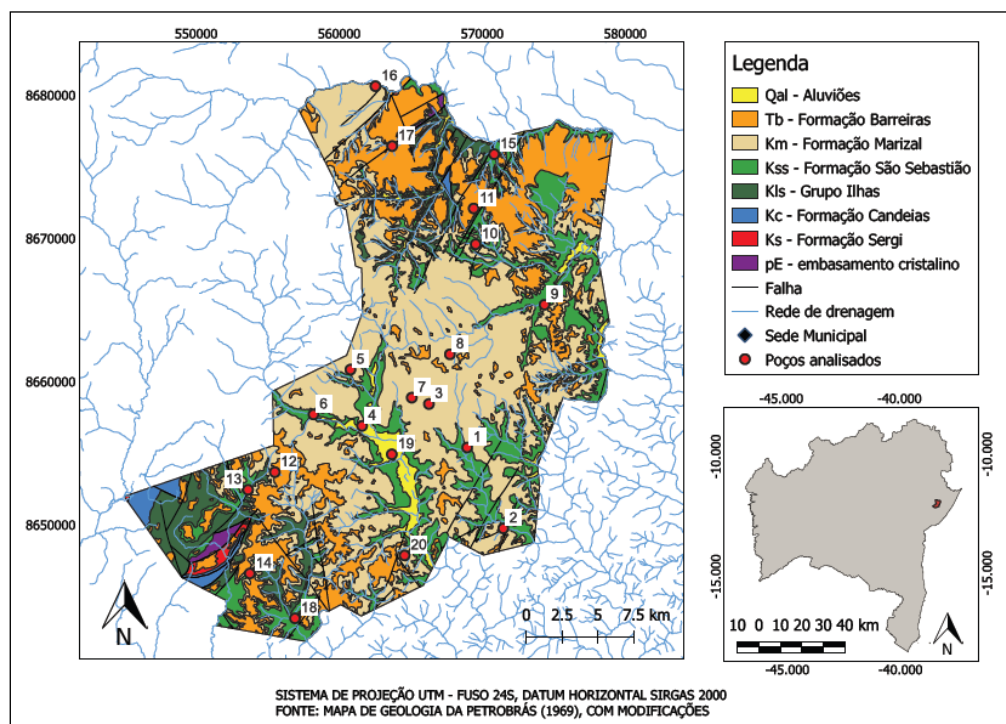


Figura 1 - Localização da área de estudo e poços analisados

2. Metodologia e Dados

A pesquisa foi desenvolvida a partir da análise de 20 amostras de águas subterrâneas provenientes de poços localizados no sistema aquífero Marizal/São Sebastião (Tabela 1), que foram coletadas neste estudo no final do período chuvoso (agosto) do ano de 2021, com apoio de campo da SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Alagoínhas). As águas desses poços são destinadas ao abastecimento público e foram escolhidos para a amostragem conforme os seguintes critérios: poços captando água das formações Marizal/São Sebastião e distribuição espacial dos poços.

Os parâmetros físico-químicos considerados neste estudo foram dezoito (18): pH, condutividade elétrica (CE), salinidade, cálcio, sódio, magnésio, potássio, nitrato, cloreto, bicarbonato, sulfato, fluoreto, fosfato, manganês, alumínio, ferro, cobre e chumbo. Essas variáveis foram selecionadas ponderando a relevância dos cátions e ânions maiores na classificação das águas subterrâneas e a relevância dos elementos menores listados na contaminação da área segundo os trabalhos de Nascimento et al. 2006; Pereira & Lima, 2007; Nascimento & Alves, 2014; Alves, 2015.

As variáveis físico-químicas foram analisadas no laboratório ALS (*Life Sciences Brazil*) e processadas estatisticamente no *software SPSS Statistics* versão 17.0, no *software Excel* e no *software PHREEQC Interactive*

Tabela 1 - Análises físico-químicas das águas subterrâneas do sistema aquífero Marizal/São Sebastião (agosto/2021)

Poços	pH	CE	Salinidade	Cálcio	Sódio	Manganês	Potássio	Nitrato	Bicarbonato
P-01	5,78	147,8	0,07	0,68	19,0	2,6	2,9	20,55	5,0
P-02	4,71	144,3	0,07	0,87	23,0	3,6	2,5	15,97	5,0
P-03	5,92	47,5	0,02	0,5	8,1	1,1	2,8	6,55	5,0
P-04	6,2	85,5	0,04	1,3	11,0	2,2	9,9	4,43	20,2
P-05	4,98	70,0	0,03	0,79	34,0	3,9	2,6	0,2	5,0
P-06	5,5	178,9	0,09	1,0	31,0	5,0	2,6	26,71	5,0
P-07	6,17	67,1	0,03	0,53	6,3	1,3	7,4	4,34	10,4
P-08	4,97	35,5	0,02	0,5	6,8	0,74	0,49	1,31	5,0
P-09	5,34	141,5	0,07	6,6	57,0	5,3	7,0	1,54	5,11
P-10	5,06	133,5	0,07	0,5	20,0	2,6	1,8	7,2	5,0
P-11	5,9	100,9	0,05	1,1	12,0	2,3	5,3	0,29	10,3
P-12	4,71	162,0	0,08	0,91	21,0	4,5	3,0	22,15	5,0
P-13	6,99	243,0	0,12	3,8	38,0	6,4	7,0	5,17	64,8
P-14	5,68	545,0	0,27	69,0	25,0	7,0	5,0	5,64	19,7
P-15	5,77	129,0	0,06	0,61	16,0	3,4	7,6	2,45	10,8
P-16	5,84	87,8	0,04	0,5	15,0	1,0	5,4	0,2	10,1
P-17	4,6	164,0	0,08	0,79	28,0	2,5	1,3	3,37	5,0
P-18	6,36	364,0	0,18	6,6	39,0	12,0	15,0	1,0	40,4
P-19	5,0	155,6	0,08	0,99	25,0	2,7	5,3	6,54	5,0
P-20	5,53	131,1	0,06	0,81	20,0	3,9	6,6	9,55	5,5

Poços	Cloreto	Sulfato	Fluoreto	Fosfato	Manganês	Alumínio	Ferro	Cobre	Chumbo
P-01	19,8	2,0	1,1	0,3	0,049	0,151	0,436	0,01346	0,005
P-02	27,5	2,0	0,35	0,3	0,109	0,17	0,05	0,01416	0,005
P-03	7,1	1,0	0,08	0,3	0,009	0,045	0,088	0,00315	0,005
P-04	11,0	1,2	0,15	0,3	0,005	0,036	0,05	0,00251	0,005
P-05	10,9	1,0	0,08	0,3	0,029	0,025	0,05	0,00873	0,005
P-06	35,1	2,0	0,22	0,3	0,055	0,13	0,05	0,00327	0,005
P-07	8,0	1,0	0,13	0,3	0,005	0,044	0,05	0,0025	0,005
P-08	6,7	1,0	0,18	0,3	0,005	0,089	0,05	0,00633	0,005
P-09	40,8	3,1	0,16	0,3	0,07	0,099	1,7	0,00351	0,005
P-10	31,1	2,0	0,41	0,3	0,105	0,037	0,05	0,01077	0,005
P-11	20,7	1,3	1,0	0,3	0,005	0,116	0,05	0,0025	0,005
P-12	32,2	2,0	0,16	0,3	0,06	0,071	0,086	0,00991	0,005
P-13	26,4	9,8	0,31	0,61	0,1	0,201	0,595	0,00294	0,005
P-14	134,0	10,0	0,8	0,3	0,243	0,164	7,4	0,0025	0,005
P-15	27,8	2,0	0,16	0,3	0,005	0,025	0,05	0,0025	0,005
P-16	16,0	1,0	0,1	0,3	0,005	0,037	0,098	0,0025	0,005
P-17	44,0	2,0	0,46	0,3	0,015	0,067	0,05	0,00674	0,005
P-18	61,2	5,0	0,4	0,3	0,167	0,025	0,05	0,0025	0,005
P-19	39,6	2,0	0,16	0,3	0,033	0,232	0,05	0,00564	0,005
P-20	27,6	2,0	0,16	0,3	0,015	0,038	0,05	0,00346	0,005

Legenda pH - potencial hidrogeniônico; CE - condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); salinidade (mg/l); cálcio (mg/l); sódio (mg/l); magnésio (mg/l); potássio (mg/l); nitrato (mg/l); bicarbonato (mg/l); cloreto (mg/l); sulfato (mg/l); fluoreto (mg/l); fosfato (mg/l); manganês (mg/l); alumínio (mg/l); ferro (mg/l), cobre (mg/l); chumbo (mg/l).

No software SPSS Statistics foram aplicadas duas técnicas de análise multivariada: a análise fatorial (FA) e a análise de agrupamento hierárquico (HCA). FA possui objetivo de reduzir o número de variáveis iniciais, com a menor perda possível de informações e agrupá-los em categorias básicas chamadas fatores. A análise fatorial calculou a combinação linear das variáveis originais, identificando a correlação entre um novo conjunto de fatores. Junto a essa técnica, utilizou-se o método de análise da componente principal (ACP) e da rotação VARIMAX normalizada. Na rotação, as variáveis são padronizadas pelo método Z scores, no qual se realoca os dados para uma posição mais simplificada no eixo cartesiano, elucidando novos fatores com cargas minimizadas (Vicini 2005; Araújo et al. 2013).

A investigação de conformidade de dados foi realizada a partir do teste estatístico de esfericidade de Bartlett e do índice KMO (Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy). A primeira testa a hipótese nula quanto a ausência de correlação entre as variáveis. O segundo serve para avaliar o valor de entrada das variáveis, cujo intervalo entre 0.5 e 0.9, pode ser utilizado para realizar a AF (Hair Jr et al. 1998; Araújo et al. 2013; Franca et al. 2018). Para encontrar o valor de KMO, utiliza-se a equação:

$$KMO = \frac{\sum_{ij} r_{ij}^2}{\sum_{ij} r_{ij}^2 + \sum_{ij} a_{ij}^2} \quad (1)$$

Legend: rij: coeficiente de correlação observado entre as variáveis i e j; aij: coeficiente de correlação parcial entre as mesmas variáveis.

A análise de agrupamento hierárquico (HCA) tem como objetivo encontrar e separar objetos em grupos similares e foi realizada considerando o maior número de atributos explicados por um único fator. Para tal, foi utilizado o método Ward que emprega como medida de similaridade a distância euclidiana quadrada (squared euclidean distance). Segundo Vicini (2005), a distância euclidiana é obtida mediante o teorema de Pitágora, para um espaço multidimensional, no qual existem n indivíduos, onde cada um possuem valores para p variáveis. Considerando dois indivíduos, I e I', a distância entre eles é dada por:

$$d_{ii} = \left[\sum_{j=1}^p \left(x_{ij} - x_{i',j} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Os resultados do HCA foram apresentados por meio de dendrogramas, com pontos de “corte” definindo o número de grupos existentes. Esse ponto de “corte” foi calculado a partir da variação da distância reescalada do coeficiente de aglomeração (Ferreira 1996).

No software Excel foi avaliado o grau de correlação entre os atributos através da matriz de correlação de Pearson. A matriz de correlação de Pearson indica o grau de relação linear entre duas variáveis, que pode ser positiva, quando o aumento da variável reflete no aumento da outra, ou negativa, quando a diminuição da variável implica na diminuição da outra. Valores de coeficiente iguais à 1 e -1 indicam uma correlação perfeita (positiva ou negativa), enquanto coeficiente de valor 0 aponta ausência de relação linear entre as variáveis. Neste estudo, o valor de corte adotado foi de 0.7, para um nível de confiabilidade de 95% (Silva 2014).

No software PHREEQC Interactive 3.0 foi analisado o índice de saturação (SI) dos elementos na água, que conforme Nascimento & Alves (2011) é a razão do Produto da Atividade Iônica (IAP) dos diversos cátions e ânions dissociados no meio aquoso com a constante de equilíbrio da equação química a uma determinada temperatura (Kc) (Equação 1), ou seja:

$$SI = \frac{IAP}{Ksp} \text{ or } \log SI = \log IAP - \log Ksp \quad (1)$$

Por fim, foi comparado os resultados das análises físico-químicas aos valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos na Portaria N° 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil 2021), na qual dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e na Resolução do CONAMA 396/2008 (Brasil 2008), que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.

2 Resultados

A análise fatorial pelo método da componente principal, foi primeiramente realizada com todas as variáveis físico-químicas: pH, condutividade elétrica, salinidade, cálcio, sódio, magnésio, potássio, nitrato, cloreto, bicarbonato, sulfato, fluoreto, fosfato, manganês, alumínio, ferro, cobre e chumbo.

Para se obter o resultado mais satisfatório na análise fatorial, foram necessárias quatro simulações baseadas nos critérios estabelecidos para essa análise, reduzindo em 55.5% a quantidade de variáveis iniciais. A simulação final preservou 10 variáveis (pH, condutividade elétrica, salinidade, cálcio, cloreto, bicarbonato, sulfato, fosfato, manganês e ferro), que foram distribuídos entre dois fatores, correspondendo a 88% da variância total acumulada. Esse resultado apresentou o KMO igual a 0.720 e o teste estatístico de esfericidade de Bartlett igual a $p < 0.01$

KMO and Bartlett's Test

<i>Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO)</i>	0.72
<i>Bartlett's Test of Sphericity</i>	df 45
	Sig <0.01
<i>Cumulative total</i>	88%

Na tabela 2 encontram-se a matriz de correlação para as 10 variáveis selecionadas na última simulação fatorial. A matriz apresentou 45 coeficientes de correlação, no qual 66.6% denotaram valores significativos. Destes, 51.1% encontraram-se no intervalo $0.6 \leq |r| < 0.9$, que conforme Callegari-Jacques (2003) é caracterizado como correlação forte. Dos coeficientes restantes (48.9%), 11.1% encontraram-se no intervalo $0.3 \leq |r| < 0.6$, que é caracterizado como correlação moderada.

A matriz de correlação registrou forte correlação entre condutividade elétrica e cálcio, cloreto, sulfato, manganês e ferro, indicando possível influência desses íons na salinidade das águas subterrâneas da área. O bicarbonato apresentou forte correlação com pH, tendo em vista sua capacidade de alcalinização do meio (Kehew 2001).

Tabela 2 - Matriz de correlação (Pearson) das variáveis físico-químicas selecionadas pela análise fatorial (agosto/2021)

Matriz de correlação	Condutividade elétrica	Salinidade	Cálcio	Cloreto	Sulfato	Manganês	Ferro	pH	Bicarbonato	Fosfato
Condutividade elétrica	1									
Salinidade	0.99	1								
Cálcio	0.83	0.82	1							
Cloreto	0.94	0.95	0.89	1						
Sulfato	0.85	0.85	0.70	0.72	1					
Manganês	0.90	0.91	0.74	0.84	0.78	1				
Ferro	0.78	0.76	0.98	0.86	0.70	0.71	1			
pH	0.20	0.19	0.09	0.02	0.43	0.09	0.074291	1		
Bicarbonato	0.47	0.47	0.18	0.20	0.75	0.42	0.141392	0.74	1	
Fosfato	0.17	0.17	0.017	0.04	0.64	0.17	0.006017	0.54	0.82	1

Legenda: pH - potencial hidrogeniônico; CE - condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); salinidade (mg/l); cálcio (mg/l); bicarbonato (mg/l); cloreto (mg/l); sulfato (mg/l); fosfato (mg/l); manganês (mg/l); ferro (mg/l).

O primeiro fator da análise fatorial contribuiu aproximadamente em 63.5% para explicar a variância total do conjunto amostral, apresentando uma alta correlação entre as variáveis condutividade elétrica, salinidade, cálcio, cloreto, sulfato, manganês e ferro (Tabela 3). As variáveis com maiores cargas fatorais foram cloreto (0.981), condutividade elétrica (0.945) e salinidade (0.945), que são variáveis indicadoras de salinidade nas águas subterrâneas (mineralização) e apresentaram maior influência na caracterização de sua qualidade.

Os parâmetros constituintes do fator 1 estão presentes na composição litológica do Sistema Marizal/São Sebastião (Alves 2015), podendo se precipitar na água subterrânea, segundo o índice de saturação (IS), preferencialmente como minerais de calcite (CaCO_3), dolomite [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], alunite [$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$], e jarosite [$\text{KFe}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$].

O segundo fator da análise fatorial representa aproximadamente 24.5% da variância total do conjunto amostral, potencializando as variáveis pH, bicarbonato e fosfato (Tabela 3). Conforme as pesquisas de Nossa (2011), Peixinho (2016) e Gomes & Franca (2019), as duas

primeiras variáveis apresentam forte correlação entre si e são indicadores de alcalinidade da água, enquanto o último participa secundariamente deste processo (Pina 2012). Essas variáveis podem estar relacionadas à presença de níveis de carbonato de cálcio nas Formações Marizal e São Sebastião. Outra explicação, está relacionada à distância percorrida pela água subterrânea a partir da zona de recarga, responsável por incorporar mais bicarbonatos e carbonatos no meio (Nascimento & Alves 2011).

Além disso, a influência do fosfato no meio aquoso também pode estar associada às atividades antrópicas. Conforme Nascimento & Barbosa (2005), alguns fertilizantes e pesticidas comumente utilizados na agricultura são derivados de compostos de fosfato, que ao serem empregados se acumulam na zona não saturada do solo, representando uma fonte de poluição para as águas subterrâneas. Segundo o mesmo estudo, o fosfato é menos preocupante que o nitrato, por ser menos móvel no meio aquoso e mais facilmente adsorvido pela litologia do aquífero por troca iônica, o que atenua sua dispersão na água. Esse composto também é encontrado junto às fezes e aos produtos de limpeza, tais como, sabões e detergentes oriundos dos efluentes domésticos.

Tabela 3 - Cargas fatoriais com variâncias explicadas e acumuladas de dez variáveis, após a rotação pelo método VARIMAX (agosto/2021).

Variáveis	Fator 1	Fator 2
pH	0,15	0,81
CE	0,95	0,24
Salinidade	0,95	0,24
Cálcio	0,94	0,16
Bicarbonato	0,24	0,95
Cloreto	0,98	0,35
Sulfato	0,76	0,62
Fosfato	0,04	0,91
Manganês	0,88	0,19
Ferro	0,91	0,27
Variância explicada pelo fator	63,5%	24,5%
Variância acumulada	88%	

Legenda: pH - potencial hidrogeniônico; CE - condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); salinidade (mg/l); cálcio (mg/l); bicarbonato (mg/l); cloreto (mg/l); sulfato (mg/l); fosfato (mg/l); manganês (mg/l); ferro (mg/l).

A análise de agrupamento utilizou os componentes selecionados pela análise fatorial para reunir as amostras quimicamente semelhantes. Conforme Franca et al. (2018), nesse tipo de análise o número de grupos é definido a partir da primeira grande diferença entre os coeficientes rescalonados do agrupamento. Neste estudo, esses coeficientes elucidam o ponto de corte 3, obtendo dois dendrogramas referentes ao fator 1 e ao fator 2, com a formação de 4 grupos de poços (Figura 2).

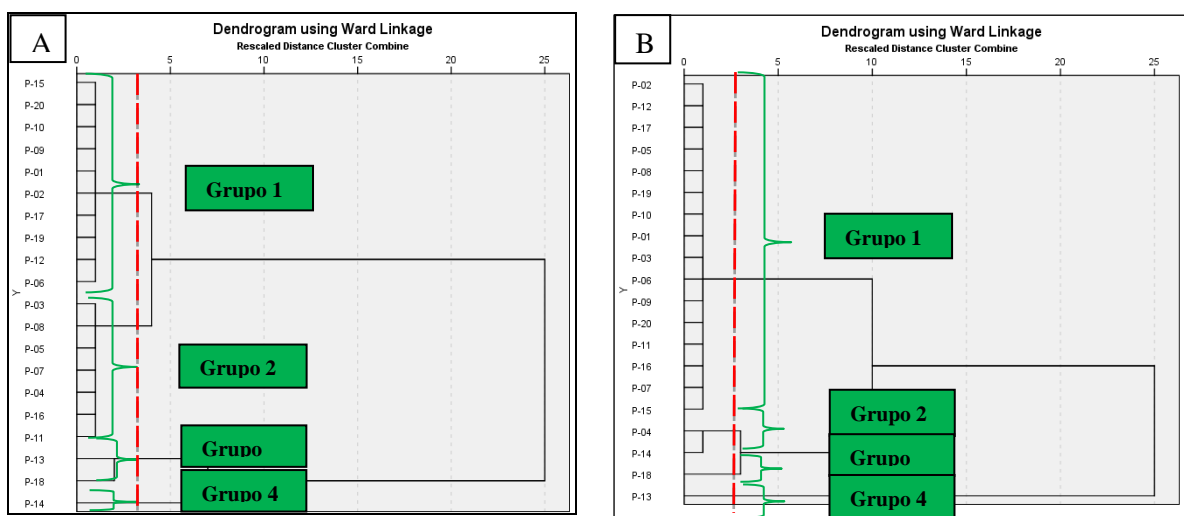


Figura 2 Dendrogramas resultantes da análise de agrupamento hierárquico das variáveis explicadas pelo: fator 1 (A) e fator 2 (B).

No primeiro dendrograma (Figura 2A), o grupo 1 foi formado por 50% (10 poços) das amostras analisadas, e dentre elas, 60% das amostras atenderam aos padrões de potabilidade estabelecidos pelo CONAMA 396/2008 e pela Portaria MS N° 888/2021, quanto a concentração de cloreto (VMP 250 mg/l), sulfato (VMP 250 mg/l), manganês (VMP 0.1 mg/l) e ferro (VMP 0.3 mg/l). As 40% das amostras remanescentes apresentaram concentrações de manganês ou ferro acima do valor máximo permitido.

A concentração de ferro apresentou-se acima do valor máximo permitido para consumo humano nos poços P-01 (0.44 mg/l) e P-09 (1.7 mg/l). Segundo os dados obtidos pelo índice de saturação (IS), esse resultado reflete a presença de íons de óxidos de ferro no meio aquoso,

possibilitando a precipitação de minerais goetita e hematita na água subterrânea do sistema Marizal/São Sebastião. Dietas com excesso de ferro, conforme Nutti et al. (2006), podem causar problemas no sistema imunológico, retardo no desenvolvimento, anemia, redução da capacidade de trabalho e óbito.

Já a concentração de manganês apresentou-se acima do valor máximo permitido para consumo humano nos poços P-02 (0.11 mg/l) e P-10 (0.11 mg/l). O índice de saturação (IS) mostrou que esse resultado reflete a presença de carbonato de manganês nas águas, possibilitando a precipitação de mineral de rodocrosita na água subterrânea do sistema Marizal/São Sebastião. Ishimine (2002) afirma que o consumo excedente de manganês, pode causar dor de cabeça, irritabilidade e instabilidade emocional, afetando diretamente o sistema nervoso central.

Com relação a qualidade da água para irrigação, as amostras do grupo 1 atenderam aos VMPs das variáveis estabelecido pela Resolução do CONAMA 396/2008, com exceção do sulfato que não apresenta concentração máxima definida. Esse grupo ainda foi caracterizado como águas de baixa salinidade, apresentando condutividade elétrica entre 19.8 e 40.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

O grupo 2 foi formado por 35% (7 poços) das amostras analisadas, no qual 100% delas atenderam aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS N° 888/2021 e pelo CONAMA 396/2008 quanto a concentração de cloreto, sulfato, manganês e ferro e, por isso deteve águas de melhor qualidade. Esse grupo apresentou águas apropriadas à irrigação, com concentrações de cloreto, manganês e ferro dentro do VMP estabelecido pelo CONAMA 396/2008. Por fim, esse grupo apresentou valores de condutividade elétrica variando entre 35.5 e 100.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando baixa salinidade nas águas.

O grupo 3 formado por 10% (2 poços) das amostras analisadas, apresentou uma amostra (P-13) com concentração de ferro (0.59 mg/l) acima do permitido pela Portaria N° 888/2021 do MS e pelo CONAMA 396/2008. Apesar disso, as águas desse grupo foram consideradas apropriadas para irrigação, denotando concentrações de cloreto, manganês e ferro dentro do VMP estabelecido pelo CONAMA 396/2008.

O grupo 4 que representa 5% (P-14) das amostras, apresentou concentração de manganês (0.24 mg/l) e ferro (7.4 mg/l) acima do VMP estabelecido pelas duas diretrizes analisadas. Além disso, essas águas foram consideradas inapropriadas para irrigação, devido as concentrações de manganês e ferro acima do VMP estabelecido pelo CONAMA 396/2008.

Ademais, esses últimos dois grupos apresentaram condutividade elétrica entre 243 e 545 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que os caracterizaram como águas de baixa e média salinidade, respectivamente. O aumento de salinidade no último grupo, segundo os resultados do índice de saturação (IS), reflete a presença de íons liberados por minerais de calcita (CaCO_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], alunita [$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$] e jarosita [$\text{KFe}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$] na água subterrânea.

No segundo dendrograma (Figura 2B) o grupo 1 foi formado por 80% (16 poços) das amostras analisadas, correspondendo aos grupos 1 e 2 do primeiro dendrograma, com exceção da amostra P-04. Esse agrupamento foi caracterizado como águas ácidas (100% das amostras), apresentando variação de pH entre 4.6 e 6.2. Deste conjunto, apenas a amostra P-07 apresentou pH (6.2) dentro do limite permitido pela Portaria N° 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil 2008) (entre 6,0 e 9,5). Além disso, o grupo 1 apresentou as menores concentrações de bicarbonato (máxima de 10,8 mg/l). Resultados semelhantes foram encontrados por Andrés (2011) e Alves (2015).

A principal razão dos valores de pH da água serem inferiores a 6 é a quantidade significativa de minerais de argila, que ao se dissolver libera sílica e alumínio para o meio (Hounslow 1995). Segundo Alves (2015), as águas subterrâneas da Formação São Sebastião apresentam-se saturadas, em alguns locais, de sílica, o que pode ser relacionado ao Membro Médio, Passagem dos Teixeira, constituído por arenitos interestratificados com siltitos, arenitos finos argilosos e raros calcários.

O grupo 2 foi formado por 10% das amostras (2 poços) que apresentaram águas 100% ácidas. Dentre elas, a amostra P-14 exibiu concentração de pH (5.7) fora do limite permitido pela Portaria N° 888/2021 do Ministério da Saúde e a amostra P-04 apresentou concentração de pH (6.2) dentro do limite estabelecido pela mesma. Esse grupo registrou concentrações intermediárias de bicarbonato (19.7 e 20.2 mg/l).

Os grupos 3 e 4 foram formados igualmente por 5% das amostras (1 poço cada) que apresentaram águas, com pH 6.4 e 7.0, respectivamente. Esses valores atenderam ao limite estabelecido pela Portaria N° 888/2021 do Ministério da Saúde. Além disso, os dois grupos apresentaram as maiores concentrações de bicarbonato, respectivamente 40.4 e 64.6 mg/l. Por fim, o grupo 4 com a amostra P-13 foi o único que apresentou concentração de fosfato (0.6 mg/l) acima do limite de detecção. No distrito de Boa União, onde ocorreu a coleta da amostra, é comum o lançamento de efluentes não tratados no rio local e o uso de pesticidas nas plantações.

Essas ações podem contribuir para o aumento da concentração de fosfato nas águas subterrâneas da área.

3 Conclusões

Verificou-se que as características das águas subterrâneas no sistema aquífero Marizal / São Sebastião estão primeiramente relacionadas a formação geológica da área e secundariamente à contaminação antrópica. A caracterização dessas águas foi realizada utilizando as variáveis determinantes de sua qualidade (pH, CE, salinidade, cálcio, cloreto, bicarbonato, sulfato, fosfato, manganês e ferro), que foram identificadas a partir da análise fatorial.

A análise de agrupamento realizada utilizando o primeiro fator (CE, salinidade, cálcio, cloreto, sulfato, manganês e ferro) mostrou que a maioria das amostras analisadas atende aos padrões de potabilidade (70%) e aos padrões para irrigação (95%) estabelecidos pela Portaria MS Nº 888/2021 e pela Resolução do CONAMA 396/2008. As amostras de água inadequadas apresentaram concentrações elevadas de íons de ferro, que podem se oxidar e precipitar sob a forma de minerais de goetita e hematita; além de concentrações de íons de manganês, que podem se precipitar sob a forma de rodocrosita, ambas associadas a litologia da área.

O agrupamento realizado utilizando o segundo fator (pH, bicarbonato e fosfato) mostrou que a maior parte das amostras apresentou águas ácidas (95%) e pH fora do limite estabelecido (85%) pela Portaria MS Nº 888/2021, estando provavelmente relacionado à dissolução de minerais de argilas oriundos do Membro Médio da Formação São Sebastião.

Os resultados mostraram que o uso da análise multivariada é relevante para o monitoramento e gestão da qualidade das águas subterrâneas, principalmente em regiões semi-áridas, como a área de estudo, caracterizados pela alta vulnerabilidade socioambiental. Além disso, a ferramenta estatística promove redução de custos, ao selecionar exclusivamente as variáveis físico-químicas mais relevantes para a caracterização da área.

Por fim, esse trabalho poderá subsidiar pesquisas futuras que almejam realizar um novo monitoramento da qualidade da água subterrânea do aquífero Marizal/ São Sebastião no município de Alagoinhas, Estado da Bahia.

4 Agradecimento

Os autores agradecem à Universidade Federal da Bahia (UFBA), ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA), a SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Alagoinhas) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CNPq) pelo apoio financeiro à essa pesquisa.

5 Referências

- Alves, J.E. 2015, 'Estudo hidrogeoquímico comparativo entre os membros da Formação São Sebastião, Recôncavo Norte – BA'. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia. <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21557>
- Andrés, H.L.J. 2011, 'Avaliação dos problemas de contaminação urbano-industrial na área de Alagoinhas, Bahia'. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia. <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/23375>
- Araujo, A.O., Mendonça, L.A.R., Lima, M.G. DE S., Feitosa, J.V., Silva, F.J., Ness, R.L.L., Frischkorn, H., Simplício, A.A.F. & Kerntopf, M.R. 2013, 'Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na Chapada do Araripe', Revista Brasileira Ciência do Solo, vol.3, no.1, pp. 754-62. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300022>
- Brasil, CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente Nº396 3 de abril de 2008, Resolução, Brasília, visto em 12 de fevereiro de 2002, < <https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-no-396-de-3-de-abril-de-2008/view>>.
- Brasil, Portaria Nº 888 de 04 de maio de 2021, Ministério da Saúde, Brasília, visto em 12 de fevereiro de 2022, < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>.
- Callegari-Jacques, S. M. 2003, Bioestatística: princípios e aplicações. Artemed, Porto Alegre.
- Costa, F.T.C., Bezera, D.C.E.J., Filho, P.J.F., Firmino, A.R.P. & Souza, B.R. 2020, 'Análise multivariada aplicada ao estudo hidroquímico das águas subterrâneas na bacia sedimentar do Araripe – CE', Revista Águas Subterrâneas, vol.34, no.2, pp.01-06. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29874>

- Ferreira, D.F. 1996, *Análise multivariada*. Lavras, Minas Gerais.
- Franca, M.R., Gomes, R.C.M., Silva, A.J.F., Lima, S.G.M. & Frischkorn, H. 2018, ‘Análise multivariada dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas em Juazeiro do Norte – CE (Brasil)’, *Revista Águas Subterrâneas*, vol.32, no.1, pp.109-10. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28890>
- Gomes, R. C. M. & Cavalcante, N.I. 2017, ‘Aplicação da análise multivariada do estudo da qualidade da água subterrânea’, *Revista Águas Subterrâneas*, vol.31, no1, pp.134-49. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28617>
- Gomes, R. C. M. & Franca, M. R. 2019, ‘Uso da análise multivariada para subsidiar no monitoramento da qualidade da água subterrânea na bacia sedimentar do Araripe, sul do Estado do Ceará’, *Revista Geociências - Unesp*, vol.38, no.1, p. 203. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i1.13052>
- Hair Jr, J.F., Anderson, R.E., Tathan, R.L. & Black, W.C. 1998, *Multivariate data analysis*, New Jersey, Prentice Hall.
- HOUNSLOW, A. W. 1995, *Water quality data: analysis and interpretation*. Lewis Publishers, New York, Boca Raton, pp.395.
- Ishimine, V. 2002, ‘Avaliação hidrogeológica e hidrogeoquímica em área contaminada por manganês na região de Suzano – SP’, *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-03112015-114039/pt-br.php>
- Kehew, A.E. 2001, *Applied chemical hydrogeology*, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, pp. 368.
- Moraes, S.R.L., Silva, J.B., Luz, D.L., Rêgo, M.J.M., Carvalho, F.M., Machado, L.N., Lima, L.A.O., Machado, L.S., Nascimento, S.A.M., Filho, A.S.S., Orrico, M.R.S., Zanta, M.V., Pereira, A.P., Santana, A.V.A., Sant’anna, M.A., Sobrinho, S.G.D., Cairo, C.F.I., Matos, T.C.C.J., Rocha, B.M., Pereira, S.O & Santana, A.R., Silva, S.S. 2004, *Plano Municipal de Saneamento ambiental de Alagoinhas*, tomo I, vol. 2, visto em 19 de janeiro de 2022. https://www.academia.edu/4455765/Plano_Municipal_de_Saneamento_Ambiental_de_Alagoinhas_Brasil_metodologia_e_resultados

- Nascimento, M.A.S. & Barbosa, F.S.J. 2005, 'Qualidade da água do aquífero freático no Alto Cristalino de Salvador, Bacia do Rio Lucaia, Salvador, Bahia', *Revista Brasileira de Geociências*, vol.35, no.4, pp. 548. <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9422>
- Nascimento, M.A.S., Moraes, S. R.L. & Santana, A.V.A. 2006, 'Estudo quali-quantitativo das águas subterrâneas no Município de Alagoinhas-Bahia como componente do Plano Municipal de Saneamento Ambiental', *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Brasil, visto em 15 de dezembro de 2021*, <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22647/14866>
- Nascimento, S.A.M. & Alves, J.E. 2011, 'Caracterização hidrogeoquímica e evolução das águas subterrâneas na área do Polo Industrial de Camaçari – Bahia', *Cadernos de Geociências*, vol.98, no.2, pp.55. <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/5256>
- Nascimento, S.A. de M. & Alves, J.E. 2014, 'Estudo hidrogeoquímico comparativo entre os aquíferos Barreiras, Marizal e São Sebastião na região do Recôncavo Norte, Estado da Bahia', *Cadernos de Geociências*, vol.11, no. 1-2, pp.72-73. <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/11318>
- Nutti, M., Carvalho, V.L.J. & Watanabe, E. 2006, 'A biofortificação como ferramenta para combate a deficiências em micronutrientes', in Silva, R.C., Figueiredo, R.B., Capitani, M.E., Cunha, G.F. (eds), *Geologia Médica no Brasil*, CPRM, pp.43. http://www.cprm.gov.br/didote/pdf/Geologia_medica_Brasil.pdf
- Nossa, T. C. B. 2011, 'Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre-Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP', Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia. <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21489>
- Peixinho, L.A. M. 2016, 'Hidrogeologia do sistema aquífero Marizal/São Sebastião na sub-bacia do Tucano Central, Estado da Bahia', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia. <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/22501>
- Pereira, A.P. & Lima, K.A.O. 2007, 'Estrutura elétrica da contaminação hídrica provocada por fluidos provenientes dos depósitos de lixo urbano e de um curtume no município de Alagoinhas, Bahia', *Revista Brasileira de Geofísica*, vol.25, no.1, pp.06-08. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000100001>.

- Pina, A.P.S.A. 2012, 'Fundamentos hidrogeoquímicos aplicados na Bacia Hidrográfica de Santa Cruz, Ilha de Santiago – Cabo Verde, como instrumento para a gestão de recursos hídricos, Fortaleza', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFC-7_ca9c79bccd234495aee45cebb7e40a3f
- Ribeiro, L.G. 2008, 'Avaliação geoelétrica da contaminação urbano-industrial do aquífero Recôncavo no entorno de Alagoinhas, Bahia', Monografia de Graduação, Universidade Federal da Bahia. <http://www.cpgg.ufba.br/gr-geof/geo213/trabalhos-graduacao/Gilson-Ribeiro.pdf>
- Santana, O.W. & Pezente, P.D. 2017, 'Análise estatística multivariada de águas subterrâneas na bacia do rio Urussanga', Revista Tecnologia e Ambiente, vol.23, no.1, pp.43-59. <http://dx.doi.org/10.18616/ta.v23i0.3905>
- Silva, S.A.C. 2014, 'Aspectos Hidrogeológicos dos Municípios de Aramiri e Ouriçangas-Bahia', Monografia de Graduação, Universidade Federal da Bahia. https://nehma.ufba.br/sites/nehma.ufba.br/files/Mon_Silva2013_2.pdf
- Vicini, L. (ed.) 2005, Análise multivariada da teoria à prática. Santa Maria, Brasil.

When submitting your manuscript, send as your last supplementary file the following information:

Author contributions: Máira Sampaio da Costa

Consider the contributions

- Conceptualization
- Formal analysis

<input checked="" type="checkbox"/>	Methodology
<input type="checkbox"/>	Validation
<input checked="" type="checkbox"/>	Writing - original draft
<input checked="" type="checkbox"/>	Writing - review and editing
<input checked="" type="checkbox"/>	Funding acquisition
<input type="checkbox"/>	Supervision
<input checked="" type="checkbox"/>	Visualization

- Other contribution

Specify contribution in more detail (required; no more than one sentence)

Author contributions: Sérgio Augusto de Moraes Nascimento

Consider the contributions

- Conceptualization
- Formal analysis

<input type="checkbox"/>	Methodology
<input checked="" type="checkbox"/>	Validation
<input type="checkbox"/>	Writing - original draft
<input checked="" type="checkbox"/>	Writing - review and editing
<input type="checkbox"/>	Funding acquisition
<input checked="" type="checkbox"/>	Supervision
<input checked="" type="checkbox"/>	Visualization

- Other contribution

Specify contribution in more detail (required; no more than one sentence)

Author contributions: Sérgio Augusto de Moraes Nascimento

Consider the contributions

- Conceptualization
- Formal analysis

<input type="checkbox"/>	Methodology
<input checked="" type="checkbox"/>	Validation
<input type="checkbox"/>	Writing - original draft
<input checked="" type="checkbox"/>	Writing – review and editing
<input type="checkbox"/>	Funding acquisition
<input checked="" type="checkbox"/>	Supervision
<input checked="" type="checkbox"/>	Visualization

- Other contribution

Specify contribution in more detail (required; no more than one sentence)

Funding information

CNPq, Process N° 140126/2020-1

Conflict of interest

The authors declare no potential conflict of interest.

Data availability statement

Scripts and code are available on request.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Essa pesquisa estudou as águas subterrâneas do sistema aquífero Marizal/ São Sebastião localizado no município de Alagoinhas, Estado da Bahia. Para a análise do meio aquoso foi realizado coleta de 20 amostras de águas subterrânea *in situ* no final do período chuvoso (agosto) do ano de 2021 e foram utilizadas 34 amostras de poços retiradas do banco de dados do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e banco de dados do SAAE (Sistema Autônomo de Água e Esgoto de Alagoinhas).

A pesquisa foi dividida em três artigos, em que o primeiro abordou a pesquisa bibliográfica dos principais métodos de vulnerabilidade à contaminação do aquífero. O segundo artigo apresentou um estudo sobre a vulnerabilidade e perigo à contaminação do sistema aquífero alvo. Por fim, o último artigo apresentou uma abordagem estatística, utilizando análise fatorial e análise de agrupamento multivariada.

A partir dos estudos bibliográficos, compilados no artigo 1, foi possível identificar que as metodologias DRASTIC e GOD são as mais apropriadas para a área de estudo, já que sua composição litológica é constituída principalmente por sedimentos arenosos. Além disso, os recursos disponíveis para a execução desse estudo proporcionaram condições para uma análise mais profunda de dados, sendo viável a utilização do método DRASTIC.

No artigo 2, foi proposto que as características litológicas do sistema aquífero São Sebastião/Marizal são os principais responsáveis pelos índices de vulnerabilidades encontradas em Alagoinhas (DRASTIC E GOD). De tal forma que as regiões preferencialmente constituídas pela Formação Marizal (região central da área) foram classificadas com vulnerabilidade intermediária à alta, em resposta aos arenitos formadores dessa Formação geológica. Já as regiões delimitadas pela Formação São Sebastião apresentaram vulnerabilidade intermediária à baixa (regiões periféricas), como resposta à presença das intercalações de arenitos e folhelhos que proporcionam maior proteção ao sistema subterrâneo.

Para a metodologia GOD, os poços que apresentaram os mais elevados índices de vulnerabilidade foram: P-02, P-03, P-06, P-08, P-13, P-14, P-15 e P-25. Para a metodologia DRASTIC foram: P-01, P-02, P-06, P-13, P-15, P-14, P-16, P-17, P-18, P-31 e P-33.

O perigo de contaminação, por considerar a vulnerabilidade e as atividade potencialmente contaminante, seguiu um padrão semelhante, no qual a zona urbana (região central da área) que sedia as principais atividades potencialmente poluidoras e é constituída preferencialmente pela Formação Marizal, apresentou o maior perigo de contaminação da área. Já a zona rural (áreas periféricas) que apresentou menores atividades potencialmente contaminantes e é formada preferencialmente pela Formação São Sebastião, apresentou menor perigo de contaminação.

Por fim, o artigo 3 indicou que as características das águas subterrâneas apresentaram maior influência das formações geológicas do que da poluição antrópica, evidenciando que apesar da elevada vulnerabilidade e perigo de contaminação de algumas regiões, as águas do sistema aquífero ainda se mantém relativamente pouco afetadas pelas atividades antrópicas desempenhadas. Os parâmetros que são mais relevantes para a caracterização do sistema são aqueles relacionados à salinidade da água (pH, CE, salinidade, cálcio, cloreto, bicarbonato, sulfato, fosfato, manganês e ferro) e secundariamente aqueles atrelados à alcalinidade/acidez do meio aquoso (pH, bicarbonato e fosfato).

A partir dos critérios estabelecidos pela Portaria MS N° 888/2021 e pela Resolução do CONAMA 396/2008, os parâmetros correlatos à salinidade indicaram que 70% das águas subterrâneas encontram-se dentro dos padrões de potabilidade e aqueles associados à alcalinidade/acidez do meio indicaram que a maior parte das águas subterrâneas são classificadas como ácidas (95%).

Por outro lado, 30% das amostras apresentam águas inadequadas para consumo humano. Dentre eles, os poços P-01, P-09, P-13 e P-14 apresentaram concentrações acima do permitido de íons de ferro e os poços P-02, P-10 e P-14 de íons de manganês. Observa-se que os poços P-01, P-02, P-13 e P-14 encontram-se, quase que em sua totalidade, localizados na região urbana da área com elevados níveis de vulnerabilidade e perigo de contaminação. Desta forma, sinaliza-se que a região urbana de Alagoinhas, o qual apresenta elevada vulnerabilidade e perigo de

contaminação, já sofre em decorrência da poluição das águas, o que resultou na sua inadequação para o consumo humano.

Diante disso, ainda se sinaliza que os métodos estatísticos utilizados descartaram o parâmetro nitrato de seus cálculos, o considerando pouco influente para as características das águas subterrâneas em estudo. Contudo, observa-se que 20% dos poços analisados apresentam valores de nitrato acima do permitido pelas portarias vigentes, sendo eles, P-01, P-02, P-06 e P-12. Os poços P-01, P-02 e P-1 se encontram na zona urbana da cidade, sendo afetados pelas cargas contaminantes existentes nesta localidade. O poço P-06, situado na zona rural do município, encontra-se próximo às grandes plantações de eucaliptos, nas quais são utilizadas grandes quantidades de produtos químicos e pesticidas, que podem ser responsáveis pelo comprometimento da qualidade da água subterrânea desse poço.

Diante do exposto, ressalta-se a necessidade de fiscalização das características das águas subterrâneas e da orientação para o uso e ocupação do solo no território do sistema aquífero em estudo, principalmente nas áreas urbanas do município, que são mais vulneráveis e apresentam um grande volume de atividades potencialmente contaminantes em funcionamento, que já comprometeram a potabilidade das águas em determinados pontos.

Salienta-se que a importância do acompanhamento dessas águas subterrâneas está atrelada à notoriedade do sistema aquífero Marizal / São Sebastião para o município em estudo e regiões próximas, sendo responsável pelo abastecimento parcial e até mesmo integral de algumas dessas localidades. Sendo assim, o comprometimento total da qualidade dessas águas representaria um sério problema para o abastecimento do interior baiano.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES

Artigo 1:

Artigo aceito para publicação em: 14/03/2022

Autores: Maíra Sampaio da Costa; Maria da Conceição Rabelo Gomes; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento.

- Maria da Conceição Rabelo Gome: Foi a coorientadora do trabalho. Discente da Universidade do Estado do Pará, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Marabá, PA, Brasil. Experiência a área de Geociências, com ênfase em Hidrogeologia.
- Sérgio Augusto de Moraes Nascimento: Orientador da pesquisa. Discente na Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente, Salvador, BA, Brasil. Experiência a área de Geociências, com ênfase em Hidrogeologia.

Artigo 2:

Artigo aceito para publicação em: 11/04/2023

Autores: Maíra Sampaio da Costa; Maria da Conceição Rabelo Gomes; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento.

- Maria da Conceição Rabelo Gome: Foi a coorientadora do trabalho. Discente da Universidade do Estado do Pará, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Marabá, PA, Brasil. Experiência a área de Geociências, com ênfase em Hidrogeologia.
- Sérgio Augusto de Moraes Nascimento: Orientador da pesquisa. Discente na Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente, Salvador, BA, Brasil. Experiência a área de Geociências, com ênfase em Hidrogeologia.

Artigo 3:

Artigo em fase final de preparação e ainda não submetido.

Autores: Maíra Sampaio da Costa; Maria da Conceição Rabelo Gomes; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento; Carlos Gleidson Campos da Purificação.

- Maria da Conceição Rabelo Gome: Foi a coorientadora do trabalho. Discente da Universidade do Estado do Pará, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Marabá, PA, Brasil. Experiência a área de Geociências, com ênfase em Hidrogeologia.
- Sérgio Augusto de Moraes Nascimento: Orientador da pesquisa. Discente na Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente, Salvador, BA, Brasil. Experiência a área de Geociências, com ênfase em Hidrogeologia.
- Carlos Gleidson Campos da Purificação: pesquisador convidado. Formado em Geologia e Mestre em Hidrogeologia, Carlos atua como especialista em meio ambiente e recursos hídricos.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

CONDIÇÕES PARA SUBMISSÃO

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

- Os textos para submissão devem ser redigidos em português ou inglês, textos em português após aprovados deveram ser traduzidos para o inglês para que sejam publicados nas duas línguas. Solicitamos declaração de tradução dos artigos.
- Os trabalhos a serem submetidos à REGNE devem ser originais e inéditos.
- O arquivo da submissão está em formato Microsoft Word.
- Manuscrito formatado sem identificação de autoria (garantia para avaliação às cegas) com no máximo 40.000 caracteres.
- Manuscrito deve seguir as diretrizes no tópico "ORIENTAÇÕES PARA AUTORES" na seção "SUBMISSÃO" e estar formatado dentro do template da revista.
- Os títulos do manuscrito, bem como os resumos, devem ser escritos em três idiomas, português, inglês e espanhol.
- Os endereços devem ser incluídos como texto ativo (ex: <https://www.ufrn.br>).
- Não é permitida a submissão do mesmo artigo para outros veículos de publicação.
- O autor é inteiramente responsável pelo conteúdo do artigo.
- A REGNE submete os originais enviados a um processo acadêmico de revisão por pares (duplo-cego).
- Indicação do ID do ORCID e link para o Currículo Lattes (para autores brasileiros).

Diretrizes para Autores

APRESENTAÇÃO DE TRABALHOS

O trabalho deve receber título, nome completo de todos os autores, título acadêmico, instituição e endereço de e-mail do autor.

Manuscrito deve estar formatado dentro do ***template*** da revista:

Título do trabalho: o trabalho deve ter um título curto e direto, direcionado ao leitor em geral. Deve ser breve, suficientemente específico e conter as palavras-chave. O título deve estar em português, espanhol e inglês.

Resumo: O trabalho deve ser acompanhado de um resumo (200 palavras), descrevendo de forma breve e clara os principais objetos e resultados do trabalho. Deve ser traduzido para português, espanhol e inglês.

Agradecimento: Os colaboradores podem receber agradecimento em um parágrafo separado no final do artigo que deve ser o mais breve possível.

Materiais gráficos: Os gráficos e fotografias devem ser legíveis e nítidos para o leitor e fornecidos em formato jpg (preto e branco ou colorido). Eles devem ser indicados por numeração sequencial. Se as ilustrações enviadas já foram publicadas, mencionar a fonte.

Gráficos e tabelas: Gráficos e tabelas são essenciais para entender a comunicação. Devem ser acompanhados de cabeçalho para entender o significado das informações sem referência ao texto, de acordo com as regras atualizadas de apresentação tabular do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Eles também têm sua própria numeração sequencial para cada tipo e seus locais devem ser marcados no texto, indicando o número do pedido.

NORMAS DOS ARTIGOS

Os artigos devem ser submetidos às normas da ABNT: NBR-10520 (informação e documentação - citação - apresentação) e NBR-6023 (informação e documentação - referência - elaboração) a partir de agosto de 2002.

NBR-10520

REGRAS GERAIS DE APRESENTAÇÃO

- O sobrenome do autor deve estar em minúsculas quando aparecer diretamente no texto. Quando entre parênteses, deve ser maiúsculo.

Exemplo:

Bird (2008) demarcates again *coastline* to the maximum limit of action of the waves in high tide, which can be in the base of cliffs or in the limit of the appearance of dunes or even to the limit of dry land.

Durante a década de 1970 Edmon Nimer e sua equipe no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) propuseram um modelo metodológico de classificação de climas baseado na “necessidade de conjugar métodos tradicionais a métodos dinâmicos” (NIMER, 1979, p.75), ou seja, levando em considerações as normais do clima em conjunção com uma classificação genético-dinâmica de climas zonais e regionais.

- Especifique no texto a página, tomo ou seção da fonte consultada, quando entre aspas diretas. Eles devem seguir a data, separados por vírgula. Nas paráfrases, a indicação das páginas consultadas é opcional.

Exemplo:

Usualmente é atribuída maior relevância ao fenômeno da brisa marítima, pois esta costuma carregar umidade do oceano para o interior do continente até distâncias de cerca de 300 km. Ao contrário, a brisa terrestre costuma provocar precipitações sobre o oceano. Entretanto, em estudo clássico Kousky (1980) percebeu que áreas costeiras do NEB (especialmente no trecho oriental) experimentam o máximo de precipitação no período noturno (entre 21h e 9h no horário local). Isso ocorreria “devido à convergência entre o fluxo médio de ar próximo à superfície procedente do oceano, e o fluxo superficial do continente para o mar devido à brisa terrestre” (TEIXEIRA, 2008, p. 283). Nas áreas entre 150-300 km para o interior, o máximo de precipitação seria registrado entre 15h e 21h local.

- A citação direta de até três linhas deve ser colocada entre aspas.

Exemplo:

A concavidade de trechos do litoral setentrional no NEB faz com que a convergência em baixos níveis da brisa terrestre com os ventos sinóticos (Alísios de sudeste) origine uma frente de brisa “no oceano, que dá origem em geral, a nuvens dispostas na forma de um grande arco com concavidade contrária à concavidade da costa” (TEIXEIRA, 2008, p. 287).

- Mais de três linhas de citação direta devem ser destacadas com espaço de 1 cm de margem esquerda usando letra menor do que a usada no texto principal.

Exemplo:

A respeito do trabalho do cientista russo, Rodrigues (2001, p. 73) comenta:

Os geossistemas, embora sejam considerados "fenômenos naturais", devem ser estudados à luz dos fatores econômicos e sociais que influenciam sua estrutura. Os geossistemas podem refletir

parâmetros sociais e econômicos que influenciam importantes conexões em seu interior. Essas influências antropogênicas podem representar o estado diverso do geossistema em relação ao seu estado original. Esse estado derivado muitas vezes pode ser mantido por meio de outras intervenções técnicas, também passíveis de reconhecimento.

SISTEMA DE CHAMADA

- As citações devem ser indicadas no texto por um sistema de chamada autor-data.
- Quando o nome do autor e a instituição responsável fazem parte da frase, você deve indicar a data e a página entre parênteses (citação direta).

Exemplo:

De acordo com Melo, Cavalcanti e Souza (2009, p. 26):

Um conjunto de variáveis meteorológicas que atua sobre a faixa equatorial dos oceanos pode definir a ZCIT, a saber: a Zona de Convergência dos Alísios (ZCA), a região do cavado equatorial, as áreas de máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e de máxima convergência de massa, e a banda de máxima cobertura de nuvens convectivas.

- As citações de diferentes textos do mesmo autor e publicadas no mesmo ano são diferenciadas pela adição de letras em ordem alfabética após data sem espaço, conforme lista de referência.

Exemplo:

O porto serviria para escoar além do sal outros produtos dos sertões do Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, mas a plataforma continental bastante rasa não abrigaria navios de grande porte (FEMENICK, 2007d) e o projeto foi abandonado.

A Rede Ferroviária Federal S/A quis construir uma linha ferroviária ligando Areia Branca e Macau a Natal, a fim de embarcar a produção de sal das fozes dos rios Açu e Mossoró pelo porto de Natal, o que também não vingou (FEMENICK, 2007e).

Outra solução aventada foi a construção de ilhas artificiais, uma nas proximidades de Macau e outra próxima a Areia Branca (FEMENICK, 2007d), mas as limitações financeiras e a maior força política de Mossoró levaram a construção de um só Porto-Ilha, que ficaria nas cercanias marítimas de Areia Branca

- Paráfrases de diferentes autores e documentos listados simultaneamente devem ser separadas por ponto e vírgula em ordem alfabética.

Exemplo:

The coast in the State of Sergipe has no record of erosion problems on its beaches (BITTENCOURT; OLIVEIRA; DOMINGUEZ, 2006; DOMINGUEZ *et al.*, 2016; DOMINGUEZ; GUIMARÃES; BITTENCOURT, 2018), but in the last decade there has been a significant reduction of its sandy beaches in some stretches.

NBR 6023

REGRAS GERAIS DE APRESENTAÇÃO

- As referências devem estar alinhadas à margem esquerda do texto em espaço simples e separadas por espaçamento de 8pt.
- O tipo de letra em negrito do recurso usado para destacar o elemento de título.

MODELOS DE REFERÊNCIA

- Livro:

Bird, E. **Coastal Geomorphology: An Introduction**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008. 436p.

- Capítulo de livro:

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. de A.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 26-42.

- Manual:

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes. Brasília, DF: INMET, 2009.

- Periódico:

Diniz, M.T.M.; Oliveira, G.P. A proposal for a mesoscale compartmentation of the Brazilian Northeast Coast. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, 565-590, 2016.

- Tese e dissertação:

PEREIRA, W. L. **Cabo das tormentas e vagas da modernidade: uma história da Companhia Nacional de Álcalis e de seus trabalhadores, Cabo Frio (1943 – 1964) Arraial do Cabo**. Niterói, 2009. 479f. Tese (Doutorado em História). Programa de Pós-Graduação em História, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2009.

Política de Privacidade

Os nomes e endereços informados nesta revista serão usados exclusivamente para os serviços prestados por esta publicação, não sendo disponibilizados para outras finalidades ou a terceiros.

ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DIRETRIZES PARA AUTORES

Normas para Publicação

1. O Anuário do Instituto de Geociências é uma publicação oficial da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, destinando-se à divulgação da produção científica de interesse amplo, caráter original e inédito, relacionada com as Geociências. Ao submeter um artigo, o(s) autor(es) do mesmo está realizando de maneira automática a transferência de direitos autorais ao Anuário do Instituto de Geociências.

2. A partir de 01/01/2022 não será cobrada qualquer tipo de taxa aos autores.

3. A partir de 01/03/2021 os textos só poderão ser redigidos em língua inglesa. O título, o resumo e palavras-chave (em português), e em inglês (*title, abstract e keywords*) sempre devem ser apresentados.

4. Os artigos podem conter até 20 páginas (tamanho A4) digitadas em espaço um e meio, incluindo ilustrações e referências. Ademais, cada arquivo submetido não poderá ultrapassar 2 Mb.

Preparação para Encaminhamento

ATENÇÃO: A IDENTIFICAÇÃO DOS AUTORES (NOMES, EMAILS E FILIAÇÃO) NÃO DEVEM CONSTAR DO ARQUIVO CONTENDO O MANUSCRITO. LEMBRE-SE TAMBÉM DE EXCLUIR OS AGRADECIMENTOS NA ETAPA DE SUBMISSÃO.

a) Textos

5. Artigos

Em sequência:

i) Título em inglês, com cada palavra iniciando com maiúscula (não escrever todo o título em maiúscula);

ii) Título em português, com cada palavra iniciando com maiúscula (não escrever todo o título em maiúscula);

iii) **Abstract** (a palavra Abstract não deve ser numerada, deve estar alinhada a esquerda e em negrito, somente com a primeira letra em maiúscula). O texto do abstract deve ser escrito em no máximo 25 linhas e em apenas 1 parágrafo;

iv) **Keywords:** (apenas três), separadas por ponto-e-vírgula (sem ponto no final);

v) **Resumo** (a palavra Resumo não deve ser numerada, deve estar alinhada a esquerda e em negrito, somente com a primeira letra em maiúscula). O texto do resumo deve ser escrito em no máximo 25 linhas e em apenas 1 parágrafo; ;

vi) **Palavras-chave:** (apenas três), separadas por ponto-e-vírgula (sem ponto no final);

vii) Legendas das figuras no corpo do texto, na posição aproximada onde deverão aparecer;

viii) Os títulos das seções (Exemplo: **Introduction, Methodology and Data, Results, Conclusions, References**), devem estar em negrito, alinhados à esquerda e com cada palavra começando com maiúscula. Hierarquizar os títulos e subtítulos em 1, 1.1, 2, 2.1, 2.2 etc. (todos em negrito). Não colocar ponto, traço ou dois pontos após o número de item, subitem, figura ou tabela.

- Editar o texto e tabelas, página tamanho A4, fonte Times New Roman, tamanho 12. As linhas de texto alinhadas à esquerda e em espaço 1,5. Todas as margens devem ter 2,5 cm. Digitar as tabelas no modo “Tabela” do Word. Digitar legenda acima da Tabela. A Tabela deve ser inserida dentro do texto em formato editável (não pode ser inserida como figura).

- Equações devem ser digitadas no texto e numeradas sequencialmente.

- Enviar o arquivo digital “.doc“ ou “.docx” via plataforma OJS, sem que esse ultrapasse 2 Mb.

- Template disponível.

6. No passo 1 da submissão, no campo **Comentários para o Editor**, indicar até três pesquisadores (nome completo e endereço de e-mail para contato) com *expertise* no tema de pesquisa que possam atuar como revisores *ad hoc*. Caberá ao Conselho Editorial do Anuário do Instituto de Geociências a escolha dos revisores, podendo incluir ou não algum(ns) dos nomes indicados.

Favor preencher os metadados com as informações completas de **todos** os autores, inclusive com números **ORCID**. A afiliação deve ser escrita por extenso na língua original da instituição e em ordem decrescente, por exemplo: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.

b) Ilustrações

7. As ilustrações gráficas e fotográficas serão numeradas sequencialmente, na ordem de sua citação no texto (Figure 1, Figure 2, Figure 3 ...), e consideradas, mesmo pranchas ou quadros, indiscriminadamente como Figuras. Figuras compostas por várias ilustrações devem ser agrupadas em apenas 1 arquivo, rotuladas com letras: Figure 1A.---; B.----;C---. Todas as ilustrações deverão ser preparadas de forma digitalizada em formato .jpg com resolução de 255 dpi. As figuras devem ser preparadas de modo a otimizar o espaço disponível.

8. Legendas e símbolos das ilustrações devem ter dimensões adequadas para permitir legibilidade. Explicar todos os símbolos. Colocar escalas gráficas dentro da área das ilustrações.

c) Referências

9. As citações no corpo do texto devem seguir o estilo Harvard. Recomenda-se a utilização do Mendeley para organização das referências no texto.

Exemplos:

Lima (2020), Lima & Silva (2021), Lima, Pereira & Silva (2021) e para quatro autores ou mais, Lima et al. (2019). No caso de várias referências, organize-as por ordem alfabética, separadas por ponto-e-vírgula. Exemplo: (Karl et al. 2015; Reynolds et al. 2010; Simon et al. 2002).

10. No final do texto, escreva as referências em ordem alfabética pelo sobrenome do primeiro autor, usando os seguintes formatos:

Artigos em Revistas:

Nobre, C.A., Mattos, L.F., Dereczynski, C.P., Tarasova, T.A. & Trosnikov, I.V. 1998, 'Overview of atmospheric conditions during the Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil (SCAR-B) field experiment', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 103, no. D24, pp. 31809–31820.

Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P. da & Custódio, I.S. 2017, 'Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 32, no. 2, pp. 171–86.

Dissertações e Teses

Perotto, H. 2017, 'Um Estudo sobre Modelagem de Ondas Oceânicas no Atlântico Sudoeste e uma Representação Espaço-temporal Uniforme de Dados de Satélite', Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Publicações em Eventos Científicos

Komar, P.D. & Gaughan, M. 1973, 'Airy wave theories and breaker height prediction', *Coastal Engineering Proceedings*, pp. 405–418.

Livros:

Palmén, E. & Newton, C.W. 1969, *Atmospheric Circulation Systems: their structure and physical interpretation*, Academic Press, San Diego, California.

Capítulos de Livros:

Satyamurty, P., Nobre, C.A. & Silva Dias, P.L. 1998, 'South America', in D.J. Karoly & D.G. Vincent (eds), *Meteorology of the Southern Hemisphere*, American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 119–39.

Citações da Web:

Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. 2021, Acesso em 14 fev. 2021, <<http://www.anda.org.br/>>.

Citações de Mapas:

Almeida, J.C.H., Heilbron, M., Guedes, E. & Ramos, R.R.C. 2018 'Mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro', 1 mapa: 80 cm x 120 cm. Escala 1:400.000.

Para maiores detalhes, consulte: Harvard Interactive Guide.pdf (uts.edu.au)

No final do artigo, após as Referências, insira as seguintes informações:

11. Contribuição de cada um dos autores

12. Financiamento

13. Conflito de interesse

14. Declaração de disponibilidade dos dados

15. Autor para correspondência

Processo de Avaliação do Manuscrito

16. Todos os trabalhos são submetidos à análise crítica inicial do Conselho Editorial e, caso possuam mérito científico e sejam relevantes para sua área de pesquisa, serão submetidos à avaliação (duplo cega) de pelo menos dois consultores *Ad doc* externos. Após concluírem a revisão de um artigo, os pareceristas preenchem um formulário de avaliação e enviam suas sugestões e recomendações para o Editor Associado responsável pelo artigo, que o repassa aos autores. No caso de julgamentos divergentes, o trabalho é enviado a um terceiro parecerista.

Procedimentos após Análise

17. Após concluídas as rodadas de revisão, os trabalhos aceitos são encaminhados para o Editor de Texto, que revisará o manuscrito e indicará ao autor de correspondência as recomendações editoriais (em anotações no próprio manuscrito).

Provas e Separatas

18. Provas dos Artigos serão remetidas aos autores (arquivo no formato PDF) para correção antes de sua publicação. Alterações necessárias deverão ser encaminhadas na prova do arquivo PDF.

© Anuário do Instituto de Geociências

CONDIÇÕES PARA SUBMISSÃO

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

1. A contribuição é original e inédita, e não está sendo avaliada para publicação por outra revista; caso contrário, deve-se justificar em "Comentários ao editor".
2. O arquivo da submissão está em formato Microsoft Word, OpenOffice ou RTF.
3. URLs para as referências foram informadas quando possível.
4. O texto segue os padrões de estilo e requisitos bibliográficos descritos em Diretrizes para Autores, na página Sobre a Revista.

DECLARAÇÃO DE DIREITO AUTORAL

Os artigos publicados nesta revista se encontram sob a licença Creative Commons — Attribution-NonCommercial 4.0 International — CC BY-NC 4.0, que permite o uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, contanto que o trabalho original seja devidamente citado e não seja usado para fins comerciais.

POLÍTICA DE PRIVACIDADE

Os nomes e endereços informados nesta revista serão usados exclusivamente para os serviços prestados por esta publicação, não sendo disponibilizados para outras finalidades ou a terceiros.

TAXAS PARA AUTORES

Este periódico cobra as seguintes taxas aos autores.

Publicação de artigo: 0,00 (USD)

A partir de 01/01/2022 as publicações no Anuário do Instituto de Geociências estão livres de qualquer tipo de taxas.

ANEXO C – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA 3

REVISTA PESQUISAS EM GEOCIÊNCIAS

Condições para submissão

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

- A submissão de um artigo implica que:
 - (i) o trabalho descrito não foi publicado anteriormente (exceto na forma de um resumo ou como parte de uma palestra ou de um trabalho de conclusão de curso, tese ou dissertação);
 - (ii) o trabalho não está sendo avaliado para publicação em outro órgão;
 - (iii) todas as informações apresentadas no manuscrito são de responsabilidade do autor signatário, bem como dos demais autores, partícipes do conteúdo submetido; e,
 - (iv) se aceito, não será publicado na mesma forma por outro órgão.
- O texto segue os padrões de estilo e requisitos bibliográficos descritos em [Diretrizes para Autores](#), na seção Sobre a Revista.

Diretrizes para Autores

Instruções aos Autores

Os manuscritos devem ser cuidadosamente preparados pelos autores observando as instruções aqui apresentadas.

A partir de 2018, as submissões são pelo Sistema Eletrônico de Editoração Eletrônica (SEER) disponibilizadas pela *Open Journal System* na base de dados da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Na etapa de submissão, os autores devem preparar um arquivo com extensão pdf, incluindo o texto e todas as ilustrações. A fim de facilitar a preparação do arquivo a ser submetido pelos autores, a revista disponibiliza um modelo de documento para acesso e utilização como padrão na confecção do arquivo de texto. As instruções gerais e o detalhamento sobre a formatação são apresentados a seguir.

[Arquivo modelo para preparação dos manuscritos](#)

Considerações Gerais

1. Os manuscritos devem ser originais, com temática relacionada com a área de Geociências, conforme tabelas de áreas de conhecimento do CNPq e da CAPES.
2. Os manuscritos devem elaborados observando rigorosamente as normas de redação da língua mãe.
3. Na submissão, o autor correspondente deverá declarar que (i) o trabalho não foi publicado anteriormente (exceto na forma de um resumo ou como parte de uma palestra ou de um trabalho de conclusão de curso, tese ou dissertação); (ii) o trabalho não está sendo avaliado para publicação em outro meio de divulgação; (iii) todas

as informações apresentadas no manuscrito são de responsabilidade do autor correspondente, bem como dos demais coautores, quando houver; e, (iv) se aceite, não será publicado na mesma forma por outro meio.

Língua

4. Línguas aceitas para submissão e publicação: português, espanhol ou inglês.
5. Manuscritos redigidos em português: além do resumo, devem conter *abstract*.
- 6 Manuscritos redigidos em espanhol: além do *resumen*, devem conter *abstract*.
7. Manuscritos redigidos em inglês ou espanhol: além do *Abstract ou Resumen*, devem conter resumo. Conservar a homogeneização da língua inglesa no formato americano ou britânico.
8. Termos não traduzidos de outra língua, distinta daquela do manuscrito, devem constar em itálico.

Formatação do manuscrito para submissão

9. Cada manuscrito pode conter um total de até 40 páginas, incluindo referências e ilustrações no formato de submissão. Páginas excedentes poderão ser publicadas mediante consulta prévia.
10. Materiais suplementares vinculados ao manuscrito (tais como figuras em formatos distintos, listas, tabelas com dados detalhados) poderão ser publicados, sob consulta, somente na forma *online*, sendo os autores responsáveis pela formatação final.
11. Resumo, *resumen* e *abstract*: devem abordar de forma clara e concisa a problemática, os objetivos, os métodos, os resultados e as conclusões, nesta ordem; comportar a dimensão da página de rosto, sem citações bibliográficas.
12. Palavras-chave (para manuscritos em português e inglês), *Palabras clave* (manuscritos em espanhol) e *Keywords* (manuscritos em português, espanhol e inglês); evitar utilizar termos já descritos no título.
13. Organizar o texto nas seguintes seções: 1 Introdução; 2 Área; material e métodos (inserir nesta seção informações sobre o estado de arte: p. ex. caracterização geológica, estratigráfica, fundamentação teórica); 3 Resultados; 4 Discussão dos resultados; 5 Conclusões; Agradecimentos, Contribuições dos Autores, Conflito de Interesse; e Referências. Seções distintas e/ou adaptadas a estas poderão ser aceitas, conforme a natureza do tema.
14. As ilustrações devem ser inseridas no arquivo Microsoft Word, na posição desejada, centralizadas, com a respectiva legenda na posição superior (no caso de tabelas e quadros) ou inferior (figuras). A primeira citação de uma ilustração no texto deve ser feita antes de sua inserção. Ordenar as ilustrações de modo fluido, de modo a facilitar a leitura do texto e sua posterior e imediata visualização.
15. Recomendações gerais sobre a formatação: (i) não usar hifenização no processador de texto; (ii) usar negrito, itálico, subscrito, sobrescrito etc., somente quando pertinente; (iii) não importar tabelas e equações de programas gráficos (use o processador de texto para criá-las); (iv) não utilizar notas de rodapé; (v) utilizar sempre os símbolos internacionais de medidas ao invés dos nomes completos (p. ex.: 7 m ao invés de 7 metros).

Ilustrações

16. Figuras, tabelas e quadros são consideradas ilustrações.
17. Figuras: são ilustrações gráficas, imagens fotográficas ou fotomicrográficas, com extensão jpg, ou jpeg, ou tiff; **não devem ultrapassar uma página em extensão com legendas**; em resolução compatível para publicação (mínima de 300 dpi).
18. Tabelas: compreendem ilustrações que armazenam informações numéricas, construídas com bordas laterais abertas; **não devem ultrapassar uma página em extensão com legendas**; editadas em *Word* ou *Excel*.

Tabelas com banco de dados completos, se necessária a publicação, devem ser inseridas em material suplementar.

19. Quadros: são ilustrações contendo elementos textuais, construídos com bordas fechadas; não devem ultrapassar uma página em extensão; **não devem ultrapassar uma página em extensão com legendas**; editados em *Word* ou *Excel*.

20. Numeração das ilustrações: o número das figuras, tabelas e quadros é independente (p. ex.: figura 1, figura 2, quadro 1, quadro 2, tabela 1), constituindo numeração e ordenamento próprios para cada tipo de ilustração, de forma sequencial.

21. Figuras compostas: trata-se de ilustração com mais de uma parte interna (vide exemplos na lista abaixo). Nestes casos, cada parte deve conter uma letra maiúscula no canto superior esquerdo, em tamanho não maior que 14, conforme exemplos que seguem. A legenda deve ser iniciada por um título geral para a figura como um todo, seguida de suas respectivas partes.

Exemplo em Hadlich et al. (2017, Pesquisas em geociências, v. 44, n. 3, p. 403)

Figura 1. Contexto geológico regional. A) Localização do Cinturão Dom Feliciano no sul do Brasil (adaptada de Chemale Jr., 2007); B) Domínios interno, central e externo do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Catarinense e falhas que os delimitam (adaptado de Basei et al., 2011a); C) Geologia da região de Gaspar (a partir de Wildner et al., 2014).

Recomendação: atentar para as normas de pontuação, que devem ser seguidas, estritamente conforme exemplos.

22. No texto, as ilustrações deverão ser citadas conforme os seguintes exemplos:
 - “A coluna estratigráfica do intervalo estudado é apresentada na Figura 5.”
 - “Dos táxons registrados, somente *G. occidentalis* (Fig. 7A) e *G. obovata* (Fig. 7B e C) correspondem...”
 - “As características pluviométricas da área estão listadas, por município, no Quadro 2, enquanto os valores das temperaturas médias e precipitação são apresentados separadamente (Tab. 3 e 4).”
 Ou seja, quando ilustrações são citadas entre parênteses, elas deverão levar inicial maiúscula e ter seu tipo abreviado (p.ex.: Fig. 1, Tab. 2 e Quadro 3). Mas de forma geral, o tipo de ilustração é escrito em maiúsculo e por extenso, por exemplo: Figura 1, Tabela 2, Quadro 3. O mesmo vale para equações numeradas.

23. Todas as ilustrações devem ser preparadas e inseridas no texto de modo a não necessitar ampliações ou reduções, com legibilidade e dimensões compatíveis a uma largura máxima de 17 cm e altura máxima de 24 cm, considerando o uso econômico dos espaços disponíveis. Evitar espaços internos em branco.

24. Ilustrações confeccionadas com gradientes de cor (ex. tons de cinza), os autores devem garantir que os tons escolhidos sejam discerníveis no formato eletrônico e impresso.

25. Legendas dos manuscritos redigidos em português: **todas as legendas das ilustrações devem vir acompanhadas de sua versão integral na língua inglesa.**

26. Legendas dos manuscritos redigidos em espanhol: **todas as respectivas legendas das ilustrações devem vir acompanhadas de sua versão integral na língua inglesa.**

27. Legendas dos manuscritos redigidos em inglês: **todas as respectivas legendas das ilustrações devem vir acompanhadas de sua versão integral na língua portuguesa.**

28. Nos casos de figuras compostas, dar nome geral à figura e, logo após, às suas partes, tal como exemplificado a seguir: Figura 1. Mapa de localização. A) Bacia de Campos; B) Localização da área de mapeamento (polígono azul). *Figure 1. Location map. A) Campos Basin; B) Location of mapping area (blue polygon).*

29. Recomendações adicionais: (i) não usar qualquer tipo de arquivo otimizado para tela (tais como GIF, BMP, PICT, WPG); (ii) molduras das figuras devem ter espessura compatível com os caracteres internos; (iii) escalas

gráficas devem ser expressas nas áreas das ilustrações; (iv) todos os símbolos devem ser explicados convenientemente nas legendas gráficas (dentro da figura) ou na legenda textual; (v) os menores símbolos ou letras devem ter uma altura mínima de 1 mm); (vi) sugere-se o uso da fonte Arial narrow para as ilustrações; (vii) no modelo de documento disponível no sítio da revista é apresentada uma tabela e um quadro, rigorosamente preparados conforme o padrão da revista.

30. Cada mapa ou imagem de localização deve comportar: seta Norte; escala de barra em quilômetros (km) ou metros (m); grade/malha e informação do sistema de coordenadas; fuso; datum.

Referências

31. Ao longo do texto e nas legendas, as citações devem seguir os formatos dos seguintes exemplos: Santos (1970), Smith & McGregor (1956), Lange (1947a, 1947b), e para três ou mais autores: Lange *et al.* (1951). Quando entre parênteses, referenciar os vários artigos primeiramente em ordem cronológica e, como segundo critério, em ordem alfabética, conforme os seguintes exemplos: (Lange, 1947a, 1947b; Lange *et al.*, 1951; Smith & McGregor, 1956; Axel, 1970; Smith, 1970).

32. O emprego do termo *apud* como recurso à citação de obras não consultadas diretamente pelo autor é desencorajado, salvo em casos excepcionais.

33. As referências devem ser listadas ao final do texto, ordenadas alfabeticamente pelo sobrenome do primeiro autor, seguido dos demais autores, conforme, criteriosamente, os exemplos fornecidos.

Livros:

Passchier, C.W., Myers, J.S. & Kroner, A. 1990. *Field geology of high-grade gneiss terrains*. Berlin, Springer-Verlag, 150p.

Capítulos **de** **livro:**

Brown, G.C. 1982. Calc-alkaline intrusive rocks: their diversity, evolution and relation to volcanic arcs. *In*: Thorpe, R.S. (Ed.). *Andesites: orogenic andesites and related rocks*. London, John Wiley, p. 437-460.

Artigos em periódicos:

Andrés, M.F. 2008. Modelización del flujo em acuífero confinado sin discretización temporal. *Boletín Geológico y Minero*, 119(2): 273-282.

Russo, R.W. 1997. Facies and facies models. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256(3/4): 7-34.

Russo, R.W. & Caldas, P.K. 2015. Anfíbolites and granulites. *Lithosphere*, 14(2): 7-21.

Russo, R.W. & Silver, P.J. 1996. Cordillera formation, mantle dynamics, and the Wilson cycle. *Geology*, 24(1): 5-35.

Russo, R.W., Oliveira, S.S. & Ramos, V. 1994. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology*, 33(supl.): 4-27.

Sommer, F.W. 1959. Introdução ao estudo sistemático dos gêneros paleozóicos de esporos dispersos. II - Pollenites. *Boletim do Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia*, 197: 5-91.

Trabalhos **publicados** **em** **anais** **de** **eventos:**

Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. & Nogueira, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBG, v. 1, p. 41-66.

Trabalhos acadêmicos:

Macedo, F.P. 1982. *Petrologia do complexo granítico de São Gabriel, RS*. Porto Alegre, 193p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Massoli, M. 1991. *Relação entre o embasamento cristalino e os sedimentos basais do Subgrupo Itararé na região de Salto de Pirapora, SP*. São Paulo, 94p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Silva, W.G. 2008. *Bioestratigrafia e variações relativas do nível do mar na Planície Costeira do Rio Grande do Sul: estudo da seção neogênica/quaternária do poço 2-CA-1-RS com base em registros palinológicos*. Porto Alegre, 84p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Relatórios internos e outras produções institucionais:

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. *Vocabulário básico de recursos minerais e meio ambiente*. 2a. ed., Rio de Janeiro, IBGE, 332p.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2002. *Diagnóstico das condições das encostas marginais dos reservatórios dos rios Tietê e Paranapanema*. São Paulo, IPT, 440p. (Relatório 23.302).
Malcom, H.J. 1979. *Report on biostratigraphical results of samples from Colorado Basin*. Houston, EXXON/SIEXF, 152p. (Internal Report).

Mapas:

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1981. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 2 v., escala 1:1.000.000.

Documentos em meio eletrônico:

Camargo, K.C. & Spoladore, A. 2009. Considerações geológicas e geomorfológicas sobre a distribuição de cavernas carbonáticas ao primeiro planalto paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009, Montes Claros. *Anais...* Montes Claros. p. 1-17. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/anais30cbe/30cbe_011-017.pdf>. Acesso em: 30 set. 2009.

Frater, H. 1998. *Landforms of the Earth*. Berlin, Springer, 1 CD-ROM.

Hinrichs, R. & Soares, A.P.P. 2001. Análise de metais pesados em pilhas e baterias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 8., 2001, Curitiba. *Anais...* Curitiba, SBGq. 1 CD-ROM.

Micheels, A., Bruch, A. & Mosbrugger, V. 2009. Miocene climate modeling sensitivity experiments for different CO₂ concentrations. *Palaeontologia Electronica*, 12(2): 1-19. Disponível em: <http://palaeo-electronica.org/2009_2/172/index.html>. Acesso em: 05 out. 2009.

ARTIGOS

Os manuscritos devem ser originais, com temática relacionada com a área de Geociências, conforme tabelas de áreas de conhecimento do CNPq e da CAPES. Na submissão, o autor correspondente deverá declarar que (i) o trabalho não foi publicado anteriormente (exceto na forma de um resumo ou como parte de uma palestra ou de um trabalho de conclusão de curso, tese ou dissertação); (ii) o trabalho não está sendo avaliado para publicação em outro meio de divulgação; (iii) todas as informações apresentadas no manuscrito são de responsabilidade do autor correspondente, bem como dos demais coautores, quando houver; e, (iv) se aceito, não será publicado na mesma forma por outro meio.

EXPEDIENTE

Publicada pela Comissão Editorial

Política de Privacidade

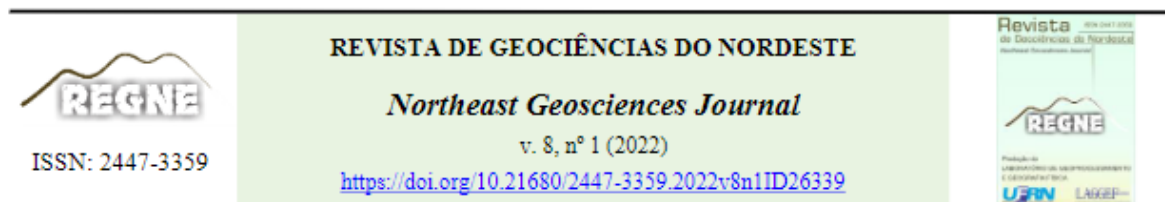
Aspectos éticos e de privacidade

À Comissão Editorial, ao Corpo Consultivo e aos consultores científicos *ad hoc* cabe a responsabilidade ética do sigilo e da colaboração voluntária para garantir a qualidade científica das publicações e da revista.

Aos autores cabe a responsabilidade da veracidade das informações prestadas, do depósito dos materiais estudados em instituições legais, quando couber, e o cumprimento das leis locais que regem a coleta, o estudo e a publicação dos dados.

A identificação dos avaliadores não é obrigatória.

ANEXO D – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 1



Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica

Aquífer vulnerability to pollution: a methodological review

Maira Sampaio da Costa¹; Maria da Conceição Rabelo Gomes²; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento³

¹ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, Brasil. Email: mairasampaio42@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0973-0822>

² Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza/CE, Brasil. Email: conceicaoabelo@yahoo.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7841-4201>

³ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, Brasil. Email: sergiomn@ufba.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1751-2323>

Resumo: As águas subterrâneas representam o maior volume de água doce disponível do planeta Terra, por isso, são consideradas um recurso indispensável para o abastecimento humano. Todavia, o avanço da civilização contribuiu para a poluição dos aquíferos, o que ampliou a necessidade de remediação e preservação desses sistemas. Devido a isso, pesquisadores estudam, desde a década de 60, o conceito de vulnerabilidade de aquíferos, proporcionando recentemente o entendimento que o grau de vulnerabilidade de um aquífero está associado a um conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada e/ou do aquífero confinante, que controlam a chegada de contaminantes ao sistema subterrâneo. Concomitantemente, o aprofundamento desse estudo foi possível graças ao viés matemático adotado, possibilitando o desenvolvimento de metodologias cartográficas que delimitam classes de vulnerabilidade, como o COP, o DRASTIC, o GOD e o AVI. No entanto, essas metodologias utilizam formulações com diferentes critérios físicos e geológicos, resultando em mapas distintos para uma mesma área de estudo. Considerando essa particularidade, este trabalho propõe apresentar a revisão bibliográfica das quatro metodologias citadas, visando indicar a melhor empregabilidade destas metodologias frente aos distintos ambientes geológicos e geográficos.

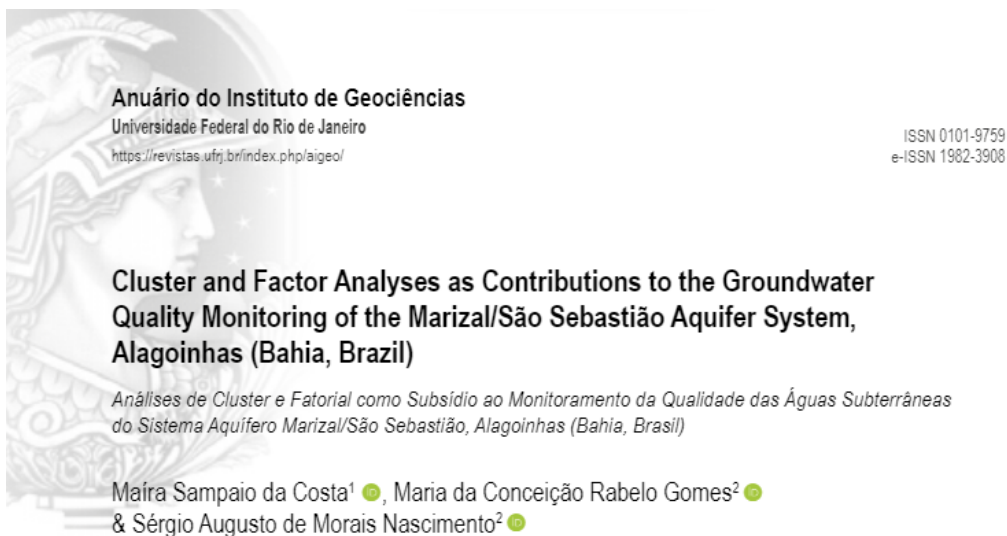
Palavras-chave: Métodos matemáticos; Revisão bibliográfica; Vulnerabilidade.

Abstract: Groundwater represents the largest volume of fresh water available on planet Earth, therefore, it is considered to be an essential resource for humanity's water supply. However, the advance of civilization has contributed to the pollution of aquifers, which has increased the necessity for the remediation and preservation of these systems. Hence, since the 1960s, researchers have been studying the vulnerability of aquifers, which has led to an understanding that the degree of vulnerability of an aquifer is associated with a set of physical, chemical and biological characteristics of the unsaturated zone and/or from the confining aquifer, which control the arrival of contaminants into the underground system. Simultaneously, delving into this study has been possible thanks to the mathematical approach that has been adopted, enabling the development of cartographic methodologies which delimit vulnerability classes, such as COP, DRASTIC, GOD and AVI. Despite that, these methodologies use formulations with different physical and geological criteria, resulting in different maps for the same study. Considering this particularity, the present study proposes to introduce a methodological review of the four above-mentioned methodologies, aiming to designate their most appropriate uses in different geological and geographic environments.

Keywords: Mathematical methods; Methodological review; Vulnerability.

Recebido: 17/08/2021; Aceito: 13/10/2021; Publicado: 16/01/2022

ANEXO E – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 3



¹Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente, Salvador, BA, Brasil

²Universidade do Estado do Pará, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Marabá, PA, Brasil

E-mails: mairasampaio42@gmail.com; conceicaoabelo@yahoo.com.br; sergiomn@ufba.br

Corresponding author: Maira Sampaio da Costa; mairasampaio42@gmail.com

Abstract

The Marizal/São Sebastião aquifer system is the main water supply of the municipality of Alagoinhas in the state of Bahia. However, anthropic interventions contribute to soil and groundwater pollution, increasing the need for related research. Multivariate statistical analysis is a widely used tool, helping in the investigation of groundwater quality while being capable of simultaneously evaluating diverse variables of a sample set. In this study, factor analysis and multivariate cluster analysis methodologies were applied. Ten of the most influential variables for groundwater quality were selected and then grouped into two factors. The first factor included electrical conductivity, salinity, calcium, chloride, sulfate, manganese, and iron, which are indicators of water salinity. The second factor encompassed pH, bicarbonate, and phosphate, indicating anthropic interventions and alkalinity in the environment. The multivariate cluster analysis was applied to the parameters of both factors, resulting in dendrograms with four clusters. The present study showed that the multivariate statistical analysis is an efficient tool for monitoring and can contribute to the management of groundwater quality.

Keywords: Sedimentary aquifer; Factor analysis; Cluster analysis

Resumo

O sistema aquífero Marizal/São Sebastião é a principal fonte de água do município de Alagoinhas no Estado da Bahia. Entretanto, as intervenções antrópicas podem contribuir para a poluição do solo e das águas subterrâneas, elevando a necessidade de pesquisas sobre o tema. Uma ferramenta amplamente utilizada para auxiliar na investigação da qualidade das águas é a análise estatística multivariada, que é capaz de avaliar simultaneamente diversas variáveis de um conjunto amostral. Neste estudo foram aplicadas a análise fatorial e a análise de agrupamento multivariada. Foram selecionadas as dez variáveis mais influentes para a qualidade das águas subterrâneas e agrupadas em dois fatores. O primeiro fator potencializou condutividade elétrica, salinidade, cálcio, cloreto, sulfato, manganês e ferro, que são indicadores de salinidade na água. O segundo fator potencializou pH, bicarbonato e fosfatos, que são indicadores de alcalinidade do meio e atividades antrópicas. A análise de agrupamento multivariada foi aplicada nos parâmetros dos dois fatores, apresentando como resultado dendrogramas com formação de quatro grupos. Esse estudo mostrou que a análise estatística multivariada é uma ferramenta eficaz no monitoramento e pode contribuir na gestão da qualidade das águas subterrâneas.

Palavras-chave: Aquífero sedimentar; Análise fatorial; Análise de agrupamento

Received: 25 August 2022; Accepted: 11 April 2023

Anu. Inst. Geociênc., 2023,46:54180

DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_54180 1

