

# Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas na Bacia Sedimentar do Araripe: revisão sistemática

*Natural vulnerability of groundwater in the Araripe sedimentary basin: a systematic review*

Vanessa Coelho Vieira<sup>1</sup>; Estelita Lima Candido<sup>2</sup>; Maria Gorethe de Sousa Lima Brito<sup>3</sup>; Paulo Roberto Lacerda Tavares<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará – Brasil, vanessacoelhovieira@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará – Brasil, estelita.lima@ufca.edu.br

<sup>3</sup>Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará – Brasil, gorethe.lima@ufca.edu.br

<sup>4</sup>Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará – Brasil, paulo.tavares@ufca.edu.br

## Recebido:

03 de setembro de 2025

## Recebido no formato de revisão:

04 de março de 2026

## Aceito:

26 de junho de 2026

## Disponível online:

20 de agosto de 2026

## Seção:

Artigos

## Palavras-chave:

Mapeamento de risco.  
Gestão ambiental.  
Aqüíferos.  
Monitoramento.  
Análise lexicométrica.

## Keywords:

Risk mapping.  
Environmental management.  
Aquifers.  
Monitoring.  
Lexicometric analysis.

<https://doi.org/10.14295/ras.v40i2.30358>



## RESUMO

A Bacia Sedimentar do Araripe está localizada no Nordeste do Brasil e desempenha papel essencial no abastecimento hídrico de uma região marcada pela escassez de água. Este estudo consiste em uma revisão sistemática sobre a vulnerabilidade dos aquíferos locais à contaminação, considerando o uso intensivo das águas subterrâneas. A pesquisa selecionou dez estudos sobre mapeamento que utilizaram os métodos GOD e DRASTIC para classificar as áreas quanto à susceptibilidade à contaminação. A análise lexicométrica dos dados foi processada no software IramuTeQ, que possibilitou a análise de similitude e a Classificação Hierárquica Descendente (CHD). A CHD reteve 78% do corpus analisado, representando adequada organização dos temas principais. Os resultados evidenciaram variação significativa nos níveis de vulnerabilidade na área de estudo, com predominância de índices baixos e moderados. Entretanto, áreas urbanas, especialmente nos municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha, apresentam pontos com maior vulnerabilidade, associados à elevada densidade populacional e à intensificação das atividades antrópicas. Essas áreas representam maior potencial de risco à contaminação dos lençóis freáticos. Os achados reforçam a importância da atualização periódica dos mapas de vulnerabilidade, associada ao monitoramento contínuo e à implementação de medidas específicas para a proteção das águas subterrâneas.

## ABSTRACT

The Araripe Sedimentary Basin, located in Northeastern Brazil, plays a strategic role in regional water supply in an area characterized by water scarcity. This study presents a systematic review of scientific research on the natural vulnerability of local aquifers to contamination, considering the intensive use of groundwater resources. Ten studies focused on vulnerability mapping were selected, primarily applying the GOD and DRASTIC methods to classify areas according to their susceptibility to contamination. A lexicometric analysis was conducted using the IramuTeQ software, enabling similarity analysis and Descending Hierarchical Classification (DHC). The DHC retained 78% of the analyzed corpus, indicating consistent thematic organization. The results revealed significant variation in vulnerability levels across the study area, with a predominance of low to moderate indices. However, urban sectors, particularly in the municipalities of Crato, Juazeiro do Norte, and Barbalha, exhibit areas of higher vulnerability associated with population density and intensified anthropogenic activities. These findings highlight the need for periodic updating of vulnerability maps, continuous monitoring, and the implementation of specific measures to ensure the protection and sustainable management of groundwater resources.

## 1. INTRODUÇÃO

Da água existente no planeta, apenas cerca de 2,5% é doce. O Brasil detém aproximadamente 12% da disponibilidade mundial de água doce mundial (Instituto Trata Brasil, 2018), quantidade expressiva quando comparado a diversos países. Contudo, essa disponibilidade não se distribui de forma homogênea pelo território. Mais da metade dos recursos hídricos concentra-se na Região Norte, onde vive menos de 10% da população brasileira, evidenciando um descompasso entre oferta hídrica e distribuição demográfica no país.

Projeções do estudo do Impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil, estudo de 2024 da Agência Nacional de Águas (ANA), indicam que a disponibilidade hídrica nas principais regiões hidrográficas brasileiras poderá sofrer reduções de até 40% até 2040, além do aumento do número de trechos de rios intermitentes. Esse cenário tende a intensificar os riscos de escassez, especialmente em áreas semiáridas.

Nesse contexto, a busca por novas alternativas de fornecimento hídrico apresenta-se como uma questão de crescente urgência, sobretudo diante da rápida redução da disponibilidade hídrica, associada ao aumento da demanda para múltiplos usos e à contínua poluição dos mananciais (Bezerra *et al.*, 2020).

O cenário descrito revela a exploração da água subterrânea como uma alternativa viável economicamente, ao passo que traz preocupações acerca do risco de contaminação e/ou poluição dos aquíferos. Quando atividades urbanas, industriais, agrícolas e de mineração não são adequadamente controladas, podem favorecer a infiltração de efluentes e resíduos no solo, bem como a lixiviação de fertilizantes e agrotóxicos, além de vazamentos associados a combustíveis e rejeitos minerais. Nessas condições, a capacidade natural do solo de atenuar ou reter contaminantes pode ser excedida, comprometendo a qualidade da água subterrânea (Foster *et al.*, 2006).

A Chapada do Araripe, situada no vale do Cariri cearense, também inserida na Bacia Sedimentar do Araripe, que abrange três sistemas aquíferos: Superior, Médio e Inferior. A configuração hidrogeológica da chapada tem destaque no cenário nacional, o que a torna conhecida como um “oásis” no semiárido do Nordeste. A exploração da água subterrânea nessa localidade é feita através de poços e nascentes, para consumo humano, agricultura, dessedentação animal, atividades industriais, entre outros usos.

O consumo excessivo dos recursos hídricos do Aquífero Médio da Bacia Sedimentar do Araripe, especialmente por meio de baterias de poços profundos, ocasiona rebaixamento expressivo dos níveis d’água (Souza, 2022). Essa redução torna-se preocupante diante do crescimento industrial acelerado e da limitada cobertura de saneamento na região.

Já, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) aponta que em 2022, na Região Metropolitana do Cariri (RMC) formada pelos municípios de Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha, apenas, 110.613 habitantes são atendidos pela infraestrutura de esgotamento sanitário, o que representa apenas 29,2% da população atendida (378.706 habitantes) pela rede de fornecimento de água. Esse cenário é alarmante, não somente pela sua repercussão sobre a saúde da população, mas pelo perigo iminente de contaminação dos mananciais subterrâneos.

Mediante, a essa realidade, a vulnerabilidade dos aquíferos é uma temática que demanda permanente investigação. Foster (1987), um dos pioneiros nos estudos relacionados a temática, descreve a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como o conjunto de atributos próprios das camadas que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina sua propensão a ser prejudicado por uma carga contaminante aplicada na superfície. Trata-se da proteção intrínseca do aquífero, ou da falta dela, contra poluentes (Aquifer Vulnerability Assessment, 2025).

Assim, um mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação normalmente é o passo inicial na avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade, em escala municipal ou estadual (Foster *et al.*, 2006). Sob essa ótica, os sistemas aquíferos da Bacia Sedimentar do Araripe têm sido objeto de diversos estudos voltados à análise da vulnerabilidade natural à contaminação.

À luz do exposto, levando em consideração a importância das avaliações de vulnerabilidade voltadas ao processo decisório dos órgãos que integram a gestão dos recursos hídricos, bem como a contribuição com uma visão

representativa do cenário ambiental de aquíferos brasileiros, o presente artigo tem como objetivo conduzir uma revisão sistemática dos estudos realizados através de, um mapeamento de áreas geográficas com foco na análise da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas na Bacia Sedimentar do Araripe, com ênfase na região do Cariri cearense.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Construção do processo de revisão

Foi utilizado um método denominado Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA). Foi feita uma pesquisa bibliográfica em artigos científicos, livros, dissertações e teses, das bases de dados Scielo, Google Acadêmico, bibliotecas virtuais, repositórios de instituições acadêmicas e periódicos CAPES.

Os trabalhos foram selecionados de forma a atenderem a três critérios de inclusão: (1) Ter entre seus objetivos a análise de dados em porções da Bacia Sedimentar do Araripe; (2) Retratarem pesquisas que envolvem mapeamento de vulnerabilidade à contaminação e/ou a poluição das águas subterrâneas e utilizam classes de vulnerabilidade; (3) Abranger somente estudos primários. Os termos de busca foram "vulnerabilidade", "contaminação", "poluição" e "água subterrânea" e "Bacia Sedimentar do Araripe". O operador booleano "e" ("and") foi aplicado em combinação com os descritores de assunto para direcionar a pesquisa, que foi feita sem filtro por ano e aceita estudos nos idiomas Português e Inglês.

### 2.2. Uso do IRAMuTeQ como ferramenta de apoio a revisão

Por meio do programa IRAMuTeQ foi conduzida a extração dos dados e estruturação do corpus de análise para realizar a análise lexicométrica. Essa análise, conforme Sousa (2021), consiste em uma estratégia que aplica métodos quantitativos (estatística descritiva e inferencial) a dados qualitativos (textos) visando realizar observações sobre as características de um conjunto de comunicações.

As conclusões dos artigos que compõem o corpus textual desta pesquisa foram agrupadas em um arquivo do tipo texto. Esta etapa é indispensável para o posterior processamento no *software Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires* (IRAMuTeQ, versão 0.7 alpha 2), que auxilia na interpretação de volumes de dados textuais.

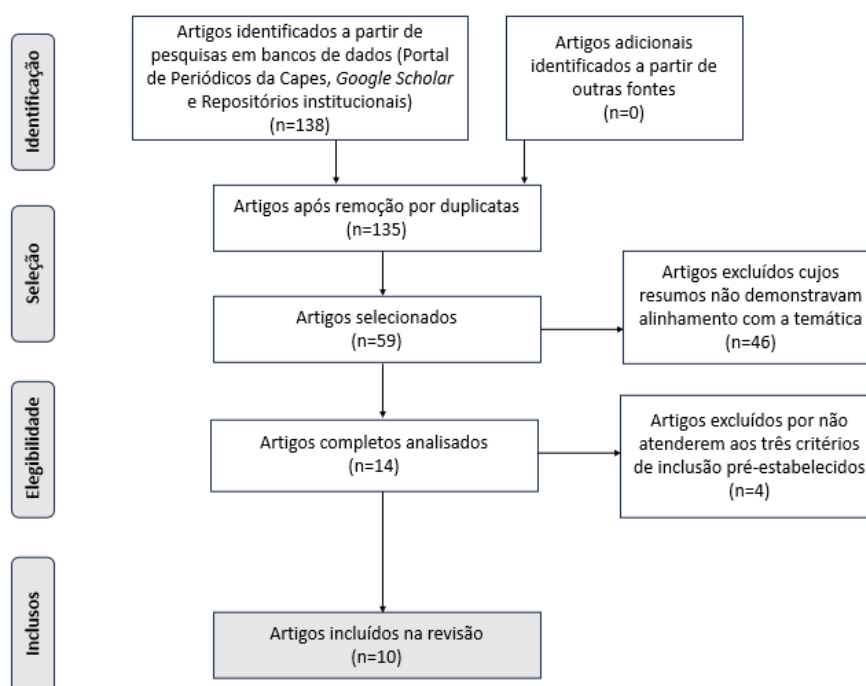
O *software* IRAMuTeQ é desenvolvido na linguagem *Python* utiliza funcionalidades providas pelo *software* estatístico R para processar suas análises (Souza et al., 2018). A análise lexicométrica realizada no *software* nesse estudo, resultou em uma interpretação dos resultados colhidos na análise de similitude e na classificação hierárquica descendente – CHD, apresentada através de dendrograma.

A análise de similitude consiste em uma técnica que identifica relações entre palavras em um corpus textual através de algoritmos de coocorrência, que gera gráficos que mostram a proximidade semântica entre os termos (Bento; Lima; Borges, 2024). Na esfera qualitativa, essa investigação se faz útil para revelar os temas e padrões nos dados.

A CHD, com base no teste de Qui-quadrado, divide o corpus em classes de segmentos de texto (ST) e agrupa aqueles que, compartilham vocabulário semelhante dentro de cada classe, mas que diferem dos ST das outras classes (Rodrigues; Carvalho; Moreira, 2023). Um percentual retido igual ou superior a 75% é um indicativo de um bom aproveitamento do corpus (Camargo; Justo, 2021).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

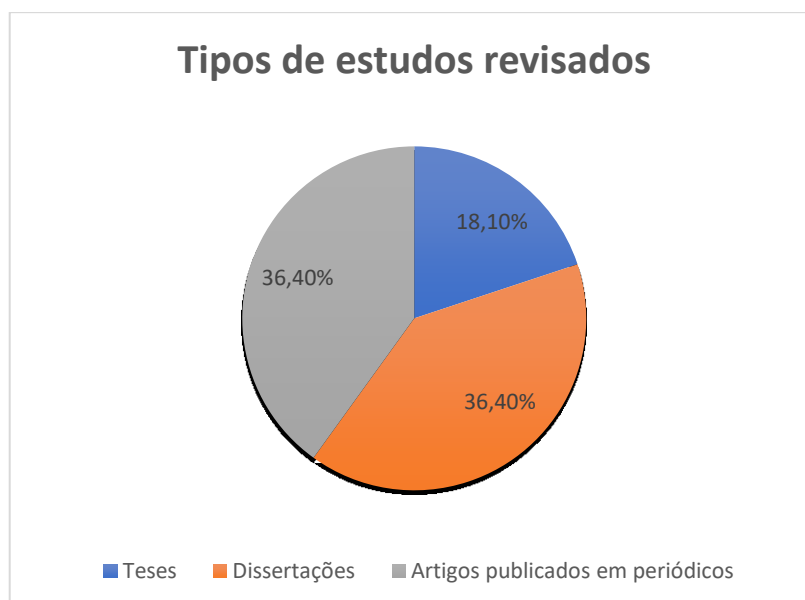
Os estudos retornados do procedimento de revisão sistemática passaram por uma triagem inicial. Foi feita a leitura dos títulos e resumos e após a leitura foram excluídas as duplicatas e estudos que não atenderam aos critérios de seleção. Os estudos que atenderam as regras estabelecidas foram analisados integralmente. Essa análise resultou em 10 estudos que foram incluídos nesta revisão. Os trabalhos revisados foram incluídos em uma planilha do *software* Microsoft Excel com as informações: autor, ano de publicação, periódico, método de mapeamento, principais resultados e considerações adicionais. A Figura 1 descreve o procedimento de revisão.



**Figura 1.** Fluxograma da primeira etapa do procedimento de revisão sistemática.

A busca inicial retornou 138 trabalhos. Após a remoção das duplicatas, permaneceram 135 trabalhos. Dessa quantidade restaram 14 estudos, onde após a leitura integral, 4 estudos foram descartados. Um total de 10 estudos atendeu por completo aos três critérios de inclusão.

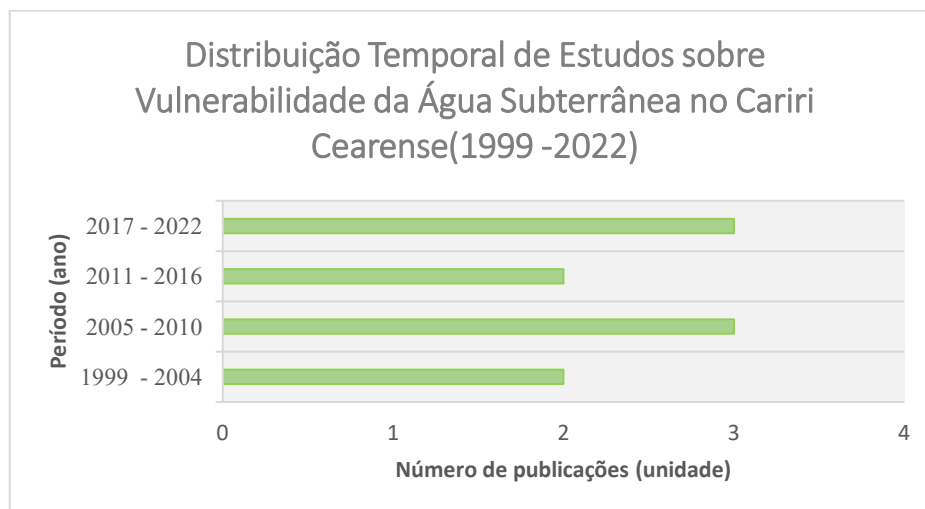
A Figura 2 apresenta os estudos, segmentados por tipo, que foram selecionados após o processo de revisão sistemática. Com base nos dados apresentados no gráfico, pode-se destacar a importância das instituições de ensino superior na produção de pesquisas sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas na Bacia Sedimentar do Araripe.



**Figura 2.** Tipos de estudo selecionados para a revisão sistemática.

O gráfico da Figura 2 revela que a parcela mais significativa dos estudos revisados provém de dissertações e artigos publicados em periódicos, ambos com 4 trabalhos (representando, cada um, o percentual de 36,40%) e a menor porcentagem (18,10%) corresponde a 2 teses de doutorado.

A Figura 3 ilustra a distribuição de publicações sobre o tema ao decorrer do tempo. Com base nessa, é possível observar que a publicação precursora de artigos relacionados a vulnerabilidade da água subterrânea no Cariri ocorreu em 1999. O fluxo de publicações se deu de forma esparsa nos anos seguintes, e oscilou entre 2 e 3 publicações a cada período de 6 anos.



**Figura 3.** Estudos sobre Vulnerabilidade da Água Subterrânea no Cariri Cearense.

A análise temporal (Figura 3) mostra que o maior aglomerado de publicações ocorreu nos intervalos de 2005 a 2010 e de 2017 a 2022, ambos com três estudos. Enquanto nos períodos de 1999 a 2004 e 2011 a 2016 foram publicados dois estudos, em cada.

O indicativo numérico de 10 estudos publicados ao longo de 23 anos é um representativo que revela a carência de fomento a novas pesquisas sobre o tema, ao levar em consideração que a vulnerabilidade, embora seja uma característica relativamente estável de um aquífero, pode sofrer alterações com o passar do tempo decorrentes de alguns processos, como por exemplo intervenções que resultem na remoção de camadas protetoras do aquífero.

O aspecto supracitado é relevante dado que a espessura e a composição dessas camadas são parâmetros considerados em vários métodos que avaliam a vulnerabilidade natural da água subterrânea.

A Tabela 1 reúne os estudos que compuseram a revisão sistemática e destaca as principais informações de cada publicação.

Fundamentada na Tabela 1, é notória que a metodologia GOD, proposta por Foster *et al.* (1988), foi de uso predominante, sendo utilizada em 8 (oito) artigos. Todavia, a metodologia DRASTIC também demonstrou sua relevância ao ser aplicada em 2 (dois) estudos, oferecendo uma perspectiva diferente e complementar ao considerar parâmetros ambientais distintos em relação ao GOD.

Também, a observação dos diferentes estudos destaca a influência da escala e da abrangência das análises. Estudos com maior detalhamento espacial, como o de Almeida (2015) na porção do Riacho dos Macacos, proporcionam uma visão mais ampla das variações locais de vulnerabilidade, o que pode contribuir para gerar estratégias de gestão mais precisas.

Em relação as classificações de vulnerabilidade, os resultados dos estudos apontam uma variação significativa ao longo da Bacia Sedimentar do Araripe. Regiões como a falha de Jardim, mencionada por Mendonça (2001), apresentam alta vulnerabilidade devido à presença de zonas não saturadas de pouca espessura e níveis estáticos rasos. Tavares, Silveira e Castro (2008) e Souza *et al.* (2022) apontam para a alta vulnerabilidade nas áreas urbanas dos municípios de Crato e Juazeiro do Norte que, associada à maior densidade populacional e às atividades antrópicas intensivas, demandam urgência de um monitoramento rigoroso e de estratégias de proteção específicas

para essas áreas críticas. Dentre os estudos que abrangeram uma porção maior da área de estudo, Tavares *et al.* (2009) apresentou resultados que apontaram índices mais preocupantes, com valores significativos de alta vulnerabilidade.

**Tabela 1 – Estudos que mapearam a vulnerabilidade natural dos aquíferos inseridos na Bacia Sedimentar do Araripe**

| Autoria/ano de publicação           | Área de Estudo                                                                                                                                                                                                  | Metodologia de mapeamento                                      | Principais resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Veríssimo (1999)                    | Parte dos municípios de Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha, inseridos na Bacia Sedimentar do Araripe                                                                                                           | GOD (Foster et al., 1987; Foster; Hirata, 1993)                | Os maiores índices de vulnerabilidade natural estão associados aos sedimentos aluvionares (Extremo-baixo), as formações Rio da Batateira, Mauriti (alto-alto), Exu e as coberturas (baixo-baixo). Os menores índices estão associados as formações Arajara (Médio-alto), Santana e Brejo Santo (médio-baixo)                                                                                                                                                            |
| Mendonça (2001)                     | Sistema Aquífero Superior da Bacia Sedimentar do Araripe                                                                                                                                                        | GOD, Foster e Hirata (1991)                                    | Alta vulnerabilidade na falha de Jardim, setor oriental; moderada vulnerabilidade, no setor oriental, além da falha de Jardim, até as proximidades de Dom Leme e no setor ocidental, na falha geológica nas proximidades do poço Serrolândia I, onde os níveis estáticos são < 100 m; baixa vulnerabilidade, no restante da chapada, onde o nível estático é > 100 m.                                                                                                   |
| Viana (2007)                        | Sistema Aquífero Médio e camadas sobrejacentes (aluviões e coberturas), na faixa entre os municípios de Crato e Missão Velha                                                                                    | GOD (Foster et al. 1987; Foster; Hirata, 1993)                 | A maior parte apresentou vulnerabilidade de negligível a baixo. A baixa vulnerabilidade é resultante de níveis argilosos que ocorrem no Vale do Cariri.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tavares, Silveira e Castro (2008)   | Município do Crato, situado na Bacia Sedimentar do Araripe                                                                                                                                                      | GOD (Foster; Hirata, 1988)                                     | Médias e altas vulnerabilidades à poluição do Aquífero do Rio da Batateira, em especial na área urbana. Nos distritos de Dom Quintino e Ponta da Serra a alta vulnerabilidade do aquífero serve como alerta para que se intensifique o cuidado com a preservação das águas subterrâneas.                                                                                                                                                                                |
| Tavares et al. (2009)               | Região limitada da Bacia Sedimentar do Araripe, composta pelos municípios de Juazeiro do Norte, Crato, Barbalha, Missão Velha, Abaiara, Brejo Santo, Milagres e Porteiras                                       | GOD (Foster; Hirata, 1988)                                     | Os resultados, em termos percentuais, revelam que a área apresenta vulnerabilidade à contaminação predominantemente variando de média (41%) à alta (59%), evidenciando a necessidade de desenvolvimento e implantação do zoneamento de proteção do manancial.                                                                                                                                                                                                           |
| Barreto (2013)                      | Sistema Aquíferos Superior e Médio (Zona de Chapada) e aquífero Aluvionar (zona de pedlano), na região da Bacia Hidrográfica do São José (BHSJ), que engloba parte dos municípios de Crato Juazeiro e Barbalha. | DRASTIC (Aller et al., 1987)                                   | Os aquíferos da Zona de Chapada foram classificados como de vulnerabilidade insignificante e na Zona de Pediplano, apresentaram as demais classificações.                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Almeida (2015)                      | A bacia hidrográfica do Riacho dos Macacos, na porção que localiza-se no município de Juazeiro do Norte                                                                                                         | GOD (Foster; Hirata, 1988)                                     | Os resultados apontaram para uma vulnerabilidade baixa na maioria da área de estudo, seguido de vulnerabilidade média e na menor proporção vulnerabilidade extrema                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Gomes, Mendonça e Cavalcante (2018) | Porção Leste da Bacia Sedimentar do Araripe, abrangendo os municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha                                                                                                    | GOD (Foster; Hirata, 1991)                                     | Os resultados obtidos com a aplicação do método GOD demonstram o predomínio de moderada vulnerabilidade natural a poluição das águas subterrâneas na área de pesquisa.                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Filgueiras e Fontenele (2021)       | Sistema Aquífero Médio da Bacia Sedimentar do Araripe                                                                                                                                                           | DRASTIC (Aller et al., 1987)                                   | A maior parte da área de abrangência apresentou baixa vulnerabilidade, influenciada pela litologia da região. As áreas referentes à vulnerabilidade alta situam-se em sua maioria, em zonas aluvionares, sob superfícies suaves com baixo percentual de declives (< 2%) e solos do tipo Neossolo Flúvico que possui caráter arenoso.                                                                                                                                    |
| Souza et al. (2022)                 | Sistema Aquífero Médio, abrangendo os municípios de Juazeiro do Norte, Crato, Barbalha, Missão Velha, Abaiara, Milagres, Brejo Santo, Porteiras e Mauriti.                                                      | Método GOD (Foster; Hirata, 1988)<br>POSH (Foster et al. 2006) | Os resultados da modelagem de vulnerabilidade natural demonstraram que a maior parte do sistema aquífero foi classificado como de média vulnerabilidade, seguida por alta vulnerabilidade e baixa vulnerabilidade. Zonas vadosas drenantes como arenitos e areias, apresentaram relevante vulnerabilidade de contaminação, em especial na região Norte do município de Juazeiro do Norte e região Nordeste do Município do Crato, justamente nas faixas do rio Salgado. |

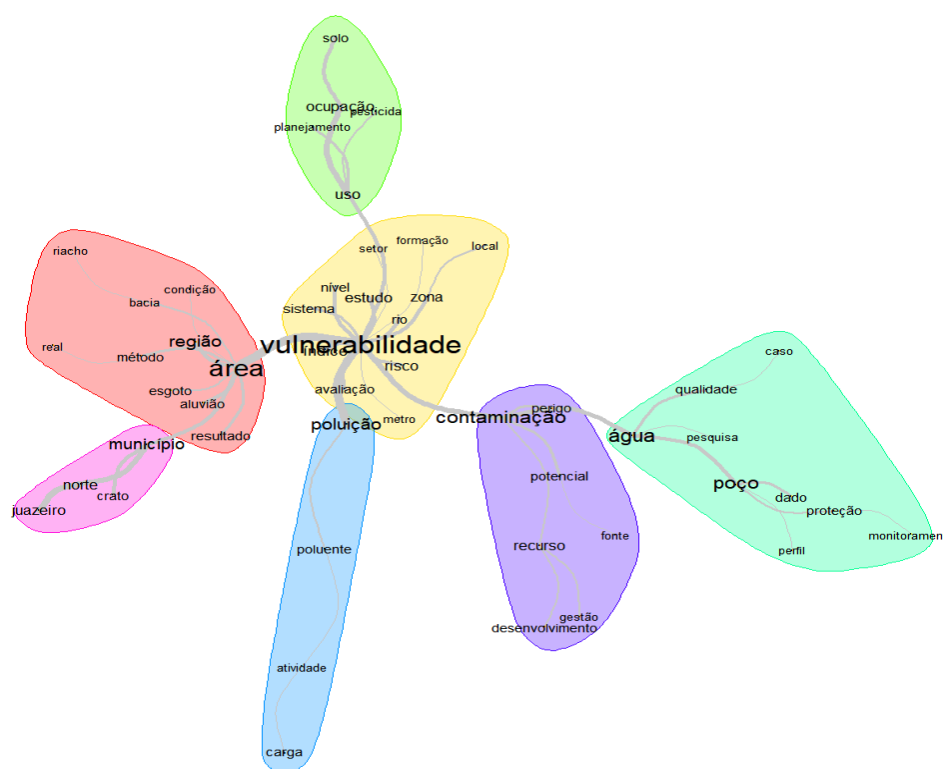
Por outro lado, algumas regiões apresentam baixa ou insignificante vulnerabilidade, como observado por Viana (2007) e Barreto (2013).

Nessas áreas, a litologia é um fator de grande contribuição para esse cenário. A presença de camadas argilosas e os níveis estáticos de maior profundidade atuam como barreiras naturais contra a contaminação.

Nesse mesmo aspecto foi abordado por Muradás, Wojahn e Coelho (2010), que em sua pesquisa realizada no Aquífero Guarani em um trecho que inclui dois municípios do Rio Grande do Sul, identificou o comportamento do argissolo 1, que devido ao seu horizonte argiloso espesso e baixa condutividade, oferece maior proteção para o aquífero.

No entanto, mesmo em áreas de baixa vulnerabilidade, Mendonça (2001) chama atenção para os riscos representados por poluentes persistentes, como metais pesados e pesticidas, que podem infiltrar-se gradualmente e acumular-se no solo e nas águas subterrâneas. Esse ponto é corroborado pelos estudos de Carriconde-Azevedo *et al.* (2012), que ao realizar experimentos de lixiviação com solos argilosos e arenosos, observaram que mesmo solos com características mais impermeáveis podem não ser suficientes para impedir a migração de poluentes, como os metais pesados, para as águas subterrâneas. Essa situação reforça a necessidade de restrições e controles mais rigorosos no manejo ambiental.

A Figura 4 exibe a representação gráfica da análise de similitude realizada pelo *software* IRAMuTeQ do corpus textual das conclusões das publicações. A construção do gráfico incluiu palavras com frequência maior ou igual a 5 ocorrências.



**Figura 4.** Análise de similitude do corpus textual dos estudos sobre vulnerabilidade dos aquíferos.

A análise de similitude (Figura 4) permitiu a identificação de sete grupos temáticos principais que estruturam o discurso científico sobre a vulnerabilidade natural dos aquíferos na região do Cariri cearense. Em uma análise desse tipo, à medida que as palavras se aproximam, maior é a relação semântica entre elas.

A partir da representação gráfica, observa-se no primeiro grupo temático, centralizado, que o termo "vulnerabilidade" ocupa uma posição central e atua como elo articulador entre os diferentes grupos, o que é esperado, por ser foco da investigação. Esse termo conecta-se diretamente a palavras como "índice", "sistema", "formação",

"zona" e "avaliação", sugerindo uma abordagem que articula conceitos hidrogeológicos com ferramentas metodológicas de avaliação, uma vez que a maioria desses termos se entrelaçam com a quantificação e espacialização do grau de vulnerabilidade dos aquíferos.

Além disso, a presença do termo "risco" traz à tona uma associação geralmente presente nos diálogos sobre vulnerabilidade e que comumente gera confusão entre os autores. Enquanto, a vulnerabilidade diz respeito às características naturais do meio físico que atenuam em algum nível a carga contaminante que pode adentrar na água subterrânea, o risco engloba a fonte de contaminação ativa ou em potencial atividade. Quando esses conceitos são utilizados como equivalentes, ocorre um viés conceitual, pois se atribui ao aquífero uma condição que depende também de fatores externos.

Dessa forma, mesmo áreas com baixa vulnerabilidade natural podem apresentar risco elevado, a depender da intensidade e natureza das pressões antrópicas incidentes.

O segundo grupo temático faz ênfase à caracterização geográfica e espacial da área de estudo, representado por termos como "área", "região", "aluviação", "bacia", "riacho", "condição". Esse agrupamento evidencia que as pesquisas contextualizaram a temática geograficamente, com ênfase em localidades específicas da área de estudo, de modo a buscar compreender as particularidades regionais e as condições hidrogeológicas locais que contribuem para a maior ou menor vulnerabilidade dos sistemas aquíferos.

O terceiro grupo se conecta com o anterior, o que se confirma por estar bem próximo na representação esquemática. Traz a delimitação geográfica específica, com as palavras "município", "Crato" e "Juazeiro". No contexto dos estudos analisados, os municípios da Região Metropolitana do Cariri (RMC) se destacaram nas discussões, como é possível perceber na presença do nome de dois dos três municípios na análise de similitude.

O quarto grupo está relacionado às fontes de poluição e às pressões antrópicas sobre os aquíferos. Ele é composto por termos como "poluição", "poluente", "atividade" e "carga", os quais remetem às ações antrópicas que afetam diretamente a qualidade das águas subterrâneas. A presença desses termos revela a necessidade crescente dos estudos em identificar e quantificar as cargas poluidoras que incidem sobre os aquíferos.

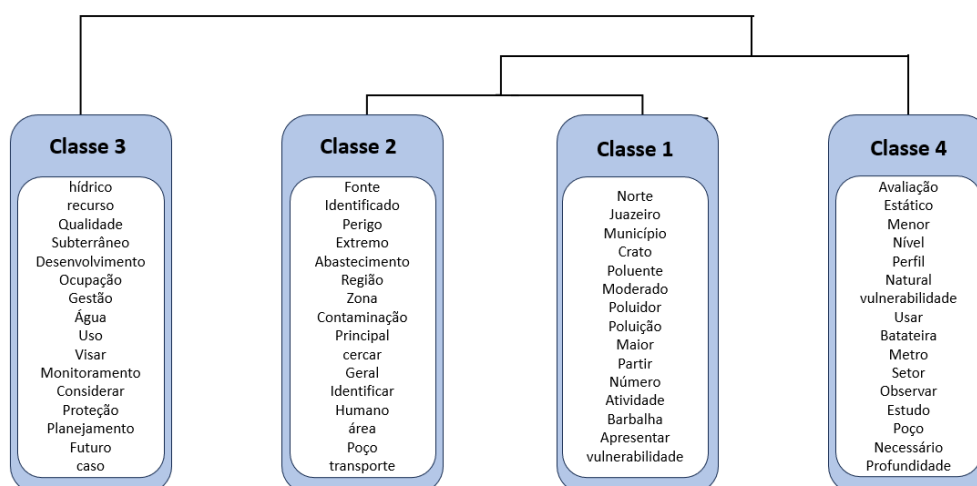
O quinto agrupamento, segue a mesma linha do anterior, porém centrado no tema da contaminação e do potencial de risco, com palavras como "contaminação", "perigo", "potencial", "recurso", "gestão", "fonte" e "desenvolvimento". Este conjunto de termos sinaliza uma preocupação não apenas com a contaminação atual, mas também com as potenciais fontes de contaminação. Há, portanto, uma articulação entre o discurso técnico e o campo da gestão e governança dos recursos hídricos.

O sexto grupo é composto pelos termos "água", "poço", "qualidade", "pesquisa", "proteção", "dado", "perfil" e "monitoramento", e diz respeito ao monitoramento e à avaliação da qualidade da água subterrânea. Essa temática reforça a importância de se conhecer as características dos poços para possibilitar o diagnóstico da vulnerabilidade, além de indicar a preocupação com o estabelecimento de medidas de proteção e controle da qualidade hídrica.

O sétimo e último grupo temático se refere ao uso e ocupação do solo, incluindo as palavras "ocupação", "uso", "solo", "pesticida" e "planejamento". Isso pode ser associado a presença, em alguns dos estudos da análise de uso e ocupação, seja com o objetivo de trabalhar também com a análise do perigo de contaminação ou com outro intuito para além da análise de vulnerabilidade. A menção ao "planejamento" também aponta para a necessidade de uma gestão territorial integrada, que considere a proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

A Figura 5 apresenta o dendrograma obtido após análise do corpus textual das conclusões dos trabalhos no software IRaMuTeQ.

O primeiro corpus foi dividido em 93 ST e a CHD reteve 70 destes (representando um aproveitamento de 75,27%). Inicialmente, o corpus foi desmembrado em dois subcorpus (de um lado a classe 3, do outro lado, as demais classes). Em seguida, a classe 4 foi separada das classes 1 e 2.



**Figura 5.** Dendrograma da Classificação Hierárquica Descendente do corpus textual dos artigos revisados.

**Fonte:** Autores (2025) (Adaptado de IRAMuTeQ).

A classe 3, com a maior representatividade, de 37,1 %, pode ser nomeada como “Gestão e Monitoramento dos recursos hídricos”. Palavras como “gestão”, “uso”, “monitoramento”, e “planejamento” indicam um foco nas estratégias de proteção diante de ameaças potenciais e gerenciamento dos aquíferos.

A classe 2, com 20% de representatividade, pode ser nomeada como “Contaminação e atividades antrópicas”. O termo “humano” pode conduzir a uma consideração de fatores antropogênicos, como a presença humana e suas atividades, associando o risco de contaminação à vulnerabilidade das áreas estudadas.

A classe 1, com 22,9% de representatividade, pode ser nomeada como “Vulnerabilidade nas áreas urbanas críticas”. Essa classe agrupa termos relacionados a estudos que se concentram em áreas específicas da Bacia Sedimentar do Araripe, como os municípios de Juazeiro, Crato, e Barbalha, que como foi abordado anteriormente, tiveram uma maior representatividade e geraram discussões nos estudos, principalmente pelos maiores índices de vulnerabilidade, quando comparado com outros municípios. O termo “atividade” pode indicar relação com as atividades industriais e humanas que geram mais impactos nessas regiões.

A classe 4, com 20% de representatividade no dendrograma, pode ser nomeada como “Características Hidrogeológicas”. A classe destacou uma abordagem mais relacionada a características utilizadas no estudo de vulnerabilidade, o que pode ser observado com os termos “estático”, “perfil” e “poço”.

#### 4. CONCLUSÃO

Conclui-se que houve um crescimento gradual, a partir dos anos 2000, no número de estudos voltados à vulnerabilidade natural dos aquíferos da Bacia Sedimentar do Araripe. A revisão sistemática evidencia o protagonismo de universidades e centros de pesquisa no avanço do conhecimento científico, reforçando que o investimento contínuo em pesquisa é fundamental para promover a sustentabilidade ambiental e fomentar soluções inovadoras frente aos desafios regionais.

A utilização do *software* IRAMuTeQ foi crucial para a análise dos dados textuais deste estudo. A análise de similaridade evidencia uma forte convergência temática entre os artigos, ao mesmo tempo em que mostrou nuances e ênfases distintas no tratamento da temática. A análise lexicométrica realizada possibilitou a identificação de padrões significativos nas conclusões dos estudos revisados, o que fornece percepções relevantes para a classificação hierárquica descendente (CHD) e permite uma interpretação mais detalhada dos principais temas abordados na literatura sobre a temática estudada.

O estudo destacou a importância de metodologias como GOD e DRASTIC na avaliação das áreas de maior vulnerabilidade de contaminação. Esses evidenciam uma variação significativa da classificação ao longo da região, com grande parte da área de estudo com índices de baixas e moderadas vulnerabilidades, porém com regiões urbanas,

especialmente nos municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha, apresenta alguns pontos de alta vulnerabilidade que, associados a fatores como elevada densidade populacional e atividades antrópicas intensivas. Esses representam áreas com importante potencial risco de contaminação.

No entanto, é importante ressaltar que a disponibilidade de dados apresenta-se como um fator limitante para a realização de análises mais precisas e abrangentes. A falta de informações detalhadas e atualizadas pode comprometer a acurácia dos modelos de vulnerabilidade, o que subestima ou superestima a classificação em determinadas áreas. Assim, a melhoria no acesso a dados de qualidade e a criação de bases de dados geoespaciais mais robustas são essenciais para que futuros estudos possam oferecer diagnósticos mais precisos.

Além disso, diante da contínua exploração dos recursos hídricos e das ameaças crescentes ao sistema aquífero, torna-se imprescindível que os estudos de mapeamento sejam constantemente atualizados para refletir as mudanças nas condições ambientais e nas práticas de uso do solo e desse modo poder contribuir para iniciativas de incentivo a proteção e para as tomadas de decisão dos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós Graduação *Stricto Sensu* em Desenvolvimento Regional Sustentável (PRODER) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento e apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. R. F. **Transporte reativo de contaminantes nitrogenados em zonas vadosa e saturada na bacia do Riacho dos Macacos em Juazeiro do Norte – Ceará**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**: resumo executivo. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: [https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Resumo\\_Executivo\\_26012024.pdf](https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Resumo_Executivo_26012024.pdf). Acesso em: 03 de agosto de 2025.

AQUIFER VULNERABILITY ASSESSMENT. **Sustainability Directory – Pollution & Sustainability**. Hong Kong, 2025. Disponível em: <https://pollution.sustainability-directory.com/term/aquifer-vulnerability-assessment/>. Acesso em: 12 de julho de 2025.

BARRETO, Artênio Cabral. **Uso de sensoriamento remoto na caracterização espacial e ambiental da aluvião do riacho São José na bacia sedimentar do Cariri cearense**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.

BENTO, L. A.; LIMA, M. D. de M.; BORGES, M. F. da C. Análise de similitude utilizada para identificar relações entre palavras dentro de um corpus textual. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, São Paulo, v. 10, n. 11, p. 3137–3143, 2024. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v10i11.16702>

BEZERRA, V. R.; LIMA, C. A. P. de; MONTERO, L. R. R.; LEITE, V. D.; MEDEIROS, K. M. de. Soluções sustentáveis no uso de águas subterrâneas da cidade de João Pessoa-PB. **MIX Sustentável**, Florianópolis, v. 6, n. 3, p. 19–26, 2020. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n3.19-26>

CAMARGO, B. V.; JUSTO, A. M. **Tutorial para uso do software de análise textual IRAMUTEQ**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

CARRICONDE-AZEVEDO, M. F.; GARNIER, J.; CAMPOS, J. E. G.; CUNHA, L. S. da. Estudo do parâmetro do solo nos métodos de determinação de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos usando colunas de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais eletrônicos** [...]. Disponível em: <https://eventossilos.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/1399.pdf>. Acesso em: 12 de agosto de 2025.

FILGUEIRAS, H. F.; FONTENELE, S. de B. Análise espacial de vulnerabilidade hídrica do sistema aquífero médio da Bacia Sedimentar do Araripe. In: CONTECC, 2021. **Anais eletrônicos** [...]. Disponível em: <https://www.confea.org.br/eventos/contecc/contecc-2021/experiencia-profissional>. Acesso em: 21 de maio de 2025.

- FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: VULNERABILITY OF SOIL AND GROUNDWATER TO POLLUTANTS, 1987. **Proceedings** [...]. Noordwijk, Países Baixos, 1987.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Washington: Banco Mundial, 2006.
- GOMES, M. C. R.; MENDONÇA, L. A. R.; CAVALCANTE, I. N. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas na porção leste da Bacia Sedimentar do Araripe, Ceará, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 3, p. 252-259, 2018.
- HIRATA, RICARDO, et al. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019.
- INSTITUTO TRATA BRASIL. **Acesso à água nas regiões Norte e Nordeste do Brasil: desafios e perspectivas**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2021. Disponível em: <https://sinapse.gife.org.br/download/acesso-a-agua-nas-regioes-norte-e-nordeste-do-brasil-desafios-e-perspectivas>. Acesso em: 08 de maio de 2025.
- MENDONÇA, L. A. R. **Recursos hídricos da chapada do Araripe**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.
- MURADÁS, K.; WOJAHN, D.; COELHO, O. G. W. Levantamento de dados geomorfológicos e hidrogeológicos para mapeamento de vulnerabilidade de contaminação do Aquífero Guarani nos municípios de Portão e Estância Velha/RS utilizando o método DRASTIC. **Ambiente & Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 172–194, 2010.
- RODRIGUES, J. G. B. de A.; CARVALHO, M. F. de; MOREIRA, M. R. C. Mudanças nas práticas de autocuidado de agentes comunitários de saúde após intervenção educativa. **Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 7, p. 7851–7866, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.7-217>
- SOUZA, A. R. de. **O perigo de poluição e a vulnerabilidade do aquífero médio na Bacia Sedimentar do Araripe**. 2022. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional Sustentável) - Universidade Federal do Cariri, Crato, 2022.
- SOUZA, M. A. R. D.; WALL, M. L.; THULER, A. C. M. C.; LOWEN, I. M. V.; PERES, A. M. O uso do software IRAMUTEQ na análise de dados em pesquisas qualitativas. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, São Paulo, v. 52, e03353, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1980-220X2017015003353>
- SOUZA, Y. S. O. O uso do software Iramuteq: fundamentos de lexicometria para pesquisas qualitativas. **Estudos e Pesquisas em Psicologia**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 1541–1560, 2021. DOI: <https://doi.org/10.12957/epp.2021.64034>
- TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, C. T. F.; SILVEIRA, J. D. G. P.; ALMEIDA JÚNIOR, F. J. B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 62, n. 2, p. 227-236, jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672009000200015>
- TAVARES, P. R. L.; SILVEIRA, J. G. P. da; CASTRO, M. A. H. de. Mapeamento da vulnerabilidade à poluição do aquífero Rio da Batateira, utilizando o método GOD, Crato-CE. **Águas Subterrâneas**, Belo Horizonte, supl. 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23758>. Acesso em: 10 de maio
- VERÍSSIMO, L. S. **A importância das águas subterrâneas para o desenvolvimento socioeconômico do eixo CRAJUBAR, Cariri Ocidental, Estado do Ceará**. 1999. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia)-Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.
- VIANA, N. O. **Vulnerabilidade e risco à poluição do sistema aquífero – entre Crato e Missão Velha, Bacia do Araripe, Ceará**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.