

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DO RIO GANGAN, EM SÃO LUÍS - MA

Bruna Roberta Floriana Oliveira Belfort

Graduanda do Curso de Ciência e Tecnologia / UFMA

E-mail: brunaroberta.belfort@gmail.com

Jonas Jansen Mendes

Professor adjunto / UFMA

E-mail: jonas.jansen@ufma.br

RESUMO

A água subterrânea desempenha um papel fundamental no abastecimento humano, especialmente em regiões com escassez de recursos hídricos superficiais. Este estudo teve como objetivo analisar a qualidade da água de poços para consumo humano na área de influência do rio Gangan, no bairro do Turu, em São Luís – MA, analisando sua conformidade com as legislações brasileiras, como a Resolução CONAMA nº 396/2008 e a Portaria GM/MS nº 888/2021. Foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas em três poços com diferentes profundidades (60 m, 30 m e 48 m). Os parâmetros analisados incluíram potencial hidrogeniônico (pH), cloretos, sólidos totais, dureza, ferro, coliformes totais e *Escherichia coli*. A partir desses dados, foi calculado o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas (IQNAS), que varia de 0 a 100, onde valores mais altos indicam melhor qualidade da água. Para a análise da vulnerabilidade do aquífero, foi aplicado o método GOD, que considera o tipo de aquífero, a litologia do aquífero e a profundidade do lençol freático. Os resultados indicaram que o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas (IQNAS) foi classificado como “inaceitável” em todos os pontos de coleta, e a vulnerabilidade do aquífero foi classificada como baixa, de acordo com o método de avaliação GOD. Apesar de os parâmetros físico-químicos estarem em conformidade com os padrões de potabilidade, foi detectada a presença de coliformes totais, o que comprometeu a potabilidade da água para consumo humano. Este estudo destaca a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água subterrânea, visando garantir a saúde pública e a sustentabilidade das fontes hídricas.

Palavras-chave: Rio Gangan; IQNAS; GOD.

ABSTRACT

Groundwater plays a fundamental role in human supply, especially in regions where surface water resources are scarce. The aim of this study was to analyze the quality of water from wells for human consumption in the area of influence of the Gangan River, in the Turu district of São Luís - MA, and to assess its compliance with Brazilian legislation, such as CONAMA Resolution No. 396/2008 and GM/MS Ordinance No. 888/2021. Physico-chemical and microbiological analyses were carried out on three wells at different depths (60 m, 30 m and 48 m). The parameters analyzed included hydrogenionic potential (pH), chlorides, total solids, hardness, iron, total coliforms and *Escherichia coli*. From this data, the Natural Groundwater Quality Index (IQNAS) was calculated, which ranges from 0 to 100, where higher values indicate better water quality. To analyze the

vulnerability of the aquifer, the GOD method was applied, which takes into account the type of aquifer, the lithology of the aquifer and the depth of the water table. The results indicated that the Natural Groundwater Quality Index (IQNAS) was classified as "unacceptable" at all the collection points, and the vulnerability of the aquifer was classified as low, according to the GOD assessment method. Although the physicochemical parameters complied with drinking water standards, the presence of total coliforms was detected, which compromised the potability of the water for human consumption. This study highlights the importance of continuous monitoring of groundwater quality in order to guarantee public health and the sustainability of water sources.

Keywords: Gangan River; IQNAS; GOD.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital para a manutenção da vida no planeta Terra, desempenhando um papel essencial na sustentação dos ecossistemas e no desenvolvimento socioeconômico das sociedades, sendo utilizada desde o abastecimento humano até a produção de bens e serviços. No entanto, nas últimas décadas, a disponibilidade de água doce tem sido pressionada por uma combinação de fatores, incluindo o crescimento populacional e a poluição dos corpos hídricos. Dessa forma, a exploração de águas subterrâneas torna-se importante, pois de acordo com Fernandes (2022), esse recurso representa cerca de 29,9% da água doce disponível na Terra. Sua utilização viabiliza abastecimento público e privado apresentando baixo custo, qualidade satisfatória e fácil obtenção.

A qualidade e a disponibilidade da água são questões de grande relevância no Brasil, um país que apresenta dimensões continentais com diferentes climas e características geográficas. A distribuição desse recurso é desigual, refletindo-se em regiões onde o acesso à água de qualidade é um desafio para as comunidades locais. Problemas como a escassez de recursos hídricos, a poluição e a má gestão das fontes de água tornam-se preocupações frequentes.

O estado do Maranhão, possui 217 municípios e uma população urbana da ordem de 4,8 milhões de habitantes (ANA, 2021). Segundo o relatório da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021), 44% da população do estado do Maranhão é abastecida por mananciais subterrâneos. Isso demonstra a importância de infraestrutura adequada e de um controle efetivo da qualidade das águas subterrâneas, para que a população, principalmente nas áreas rurais, não seja exposta a potenciais riscos à saúde, sendo necessário, portanto, um esforço contínuo das autoridades públicas e dos órgãos gestores para garantir que as fontes de água sejam seguras.

De acordo com Fernandes (2022), apesar de possuir reservas com grandes volumes e qualidade superior por estar mais protegida, se comparada com a água superficial, no entanto, não se encontra livre de contaminações por ações antrópicas, como aplicação de fertilizantes agrícolas, fossas sépticas, cemitérios, efluentes industriais, deposição inadequada de resíduos sólidos, dentre outros. Assim, é importante que seja feito o monitoramento, a partir de análises de parâmetros microbiológicos, físicos e químicos da água.

A partir disso, é notória a relevância de investigação da qualidade da água de poços para abastecimento humano, afinal a garantia de acesso à água potável é de extrema importância. Para a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde, a água para consumo humano é definida como “água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal,

independentemente da sua origem”. Portanto, a adequação em conformidade com os limites estabelecidos pelas respectivas normas de qualidade da água é essencial para garantir a saúde pública e prevenir doenças relacionadas ao consumo de água contaminada, garantindo a promoção do bem-estar da população e a proteção do meio ambiente.

Nesse contexto, a pesquisa justifica-se pela necessidade de investigar a qualidade da água dos poços, considerando as diretrizes previstas pelas legislações ambientais e de saúde pública. Órgãos como o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regulamenta os padrões de qualidade da água por meio de resoluções como a CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água, e a CONAMA nº 396/2008, que estabelece classificação e diretrizes para as águas subterrâneas no Brasil. Além disso, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece os padrões de potabilidade da água para consumo humano, sendo uma referência para a avaliação da segurança da água captada em poços. Portanto, entender como está a qualidade da água em determinada localidade é fundamental para o desenvolvimento de medidas de controle, a proteção das fontes hídricas e a saúde pública.

Dessa maneira, o objetivo da pesquisa é avaliar a qualidade e a vulnerabilidade da água subterrânea para consumo humano na área de influência do rio Gangan no bairro do Turu, localizado no município de São Luís - MA, verificando sua conformidade com a legislação, aplicando o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas (IQNAS) e identificando o grau de vulnerabilidade do aquífero.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Águas Subterrâneas

As águas subterrâneas encontram-se armazenadas nos aquíferos, resultante do processo de percolação da água superficial no solo por infiltração. Conforme a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS, 2025), a água subterrânea pode ser definida, como toda água que ocorre abaixo da superfície da terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras de rochas compactas. Além disso, desempenha um importante papel na umidade do solo e fluxo de rios, lagos e brejos.

A água freática está presente em formações geológicas conhecidas como aquíferos e desempenha um papel crucial no ciclo da água. Dentro de um aquífero, a água se movimenta lentamente, iniciando-se na área de recarga, onde chuvas e outras formas de precipitação se infiltram. Em seguida, avança em direção à zona de descarga, onde esses fluidos emergem e se integram aos cursos d'água superficiais, como rios, lagos e mares (HIRATA et al., 2019).

Um aquífero é definido pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas como uma formação geológica do subsolo, composta por rochas permeáveis que armazenam água em seus poros ou fraturas. Além disso, pode ser entendido como o material geológico capaz de servir como repositório e transmissor da água armazenada. Segundo a ABAS (2025), a qualidade do aquífero como reservatório e a velocidade da água em seu meio dependem de sua constituição geológica. Quanto à porosidade, os aquíferos podem ser classificados como porosos/sedimentares, fraturados/fissurais ou cársticos. Em relação à pressão da água, podem ser classificados como aquíferos freáticos/livres ou aquíferos confinados/artesianos.

As águas subterrâneas, ao contrário das superficiais, não se manifestam com facilidade. No Brasil, elas podem ser extraídas por meio de poços tubulares (artesianos

ou semi-artesianos), poços escavados e nascentes. No entanto, apesar da exigência legal de registro e/ou autorização para a outorga de água, o número exato de poços no país permanece desconhecido, com as captações regulares de poços tubulares representando pouco mais de 1% (HIRATA et al., 2019). Por ser uma parte fundamental do ciclo hidrológico, a água subterrânea deveria ser constantemente considerada no manejo territorial e nos investimentos em infraestrutura. Contudo, essa questão muitas vezes não é abordada, ficando frequentemente fora da agenda política relacionada ao uso de recursos hídricos e ao planejamento urbano (CONICELLI et al., s.d.).

De acordo com Hirata et al (2019) as águas subterrâneas apresentam geralmente excelente qualidade natural e, em grande parte das vezes, dispensa-se o tratamento na maioria das captações, além disso o aquífero possui volumosa capacidade de armazenamento de água, promovendo vazões estáveis dos poços mesmo após períodos longos de estiagem. Os poços também apresentam baixo custo de operação e manutenção, funcionando de maneira autônoma e são feitos em obras simples e rápidas.

O uso de mananciais subterrâneos é significativo no Maranhão, com mais de 70% das sedes urbanas recebendo esse abastecimento. Conforme dados da ANA (2021), os estados com as maiores porcentagens incluem Mato Grosso do Sul (80%), Piauí (78%), Maranhão (74%), Pará (74%) e Amazonas (71%), totalizando um atendimento a uma população urbana de 7 milhões de habitantes. Esses dados ressaltam a necessidade de um monitoramento contínuo da qualidade da água subterrânea, essencial para a preservação das fontes hídricas e a proteção da saúde pública.

2.2. Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas (IQNAS)

O Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas (IQNAS) é um método utilizado para avaliar a qualidade da água subterrânea com base em parâmetros físico-químicos e microbiológicos. De acordo com Oliveira et al. (2006), o IQNAS foi desenvolvido com base na metodologia utilizada para a criação do Índice de Qualidade das Águas (IQA), elaborado pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo).

O IQNAS é uma ferramenta importante para a comunidade, seu grande diferencial é a capacidade de sintetizar informações de forma clara, permitindo a avaliação de qualidade da água em diversos pontos de um mesmo recurso hídrico, o que facilita o acesso e a compreensão dos dados relativos à qualidade da água (Oliveira *et al.* 2006).

O índice proposto segue os princípios geralmente adotados na construção de índices de qualidade, os quais incluem: (1) a limitação do número de variáveis, garantindo objetividade e praticidade; (2) a seleção de parâmetros químicos relevantes, como pH, cloreto, sólidos totais, dureza, ferro e manganês, essenciais para a avaliação da qualidade das águas subterrâneas em diversos tipos de domínios hidrogeológicos; e (3) a escolha de variáveis cujos dados são frequentemente disponíveis nas análises químicas de águas subterrâneas (OLIVEIRA et al., 2006).

Dessa forma, avaliar a qualidade da água através do Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas possibilita, a partir da sua escala de 0 a 100, classificar a água de maneira objetiva, auxiliando na gestão de recursos hídricos, monitoramento do uso da água para consumo humano, além de contribuir para decisões sobre proteção e recuperação de aquíferos.

2.3. Vulnerabilidade de Aquíferos

As águas subterrâneas constituem uma importante fonte alternativa para enfrentar o problema de disponibilidade hídrica. Nesse contexto, seu uso tem se tornado cada vez mais indispensável. Contudo, o desenvolvimento humano e a expansão urbana das últimas décadas contribuem significativamente para a poluição dos aquíferos. Dessa forma, como a remediação de aquíferos é frequentemente onerosa e de difícil execução, torna-se essencial aprofundar estudos sobre a vulnerabilidade e preservação desses sistemas (COSTA et al., 2022).

Segundo Silva (2012), o estudo da vulnerabilidade constitui o passo inicial na avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas. Além disso, serve como uma importante ferramenta para o planejamento de ações e políticas voltadas à proteção dos mananciais subterrâneos, permitindo a identificação e a representação cartográfica de áreas críticas.

A contaminação dos aquíferos pode ser causada por fenômenos naturais ou atividades antrópicas. Entre as fontes naturais, destaca-se a incorporação de elementos químicos à água, resultante da dissolução de minerais presentes nas rochas, como ferro e manganês. Ademais, poços mal construídos ou abandonados, com ausência de fechamento adequado, revestimentos corroídos ou danificados, ou ainda construídos sem a observância de critérios técnicos, também contribuem para a contaminação (FERNANDES, 2022).

Por outro lado, de acordo com Fernandes (2022), as formas antrópicas podem incluir a disposição inadequada de resíduos sólidos em aterros industriais, controlados, domésticos e hospitalares, o uso indiscriminado de defensivos agrícolas, e a contaminação pela infiltração de efluentes industriais e domésticos não tratados. Assim como os mananciais superficiais, os subterrâneos também enfrentam dificuldades devido à contaminação por esgotos não coletados e inadequadamente tratados, o que compromete a qualidade da água, tornando-se o principal contaminante (ANA, 2021).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da Área de Estudo

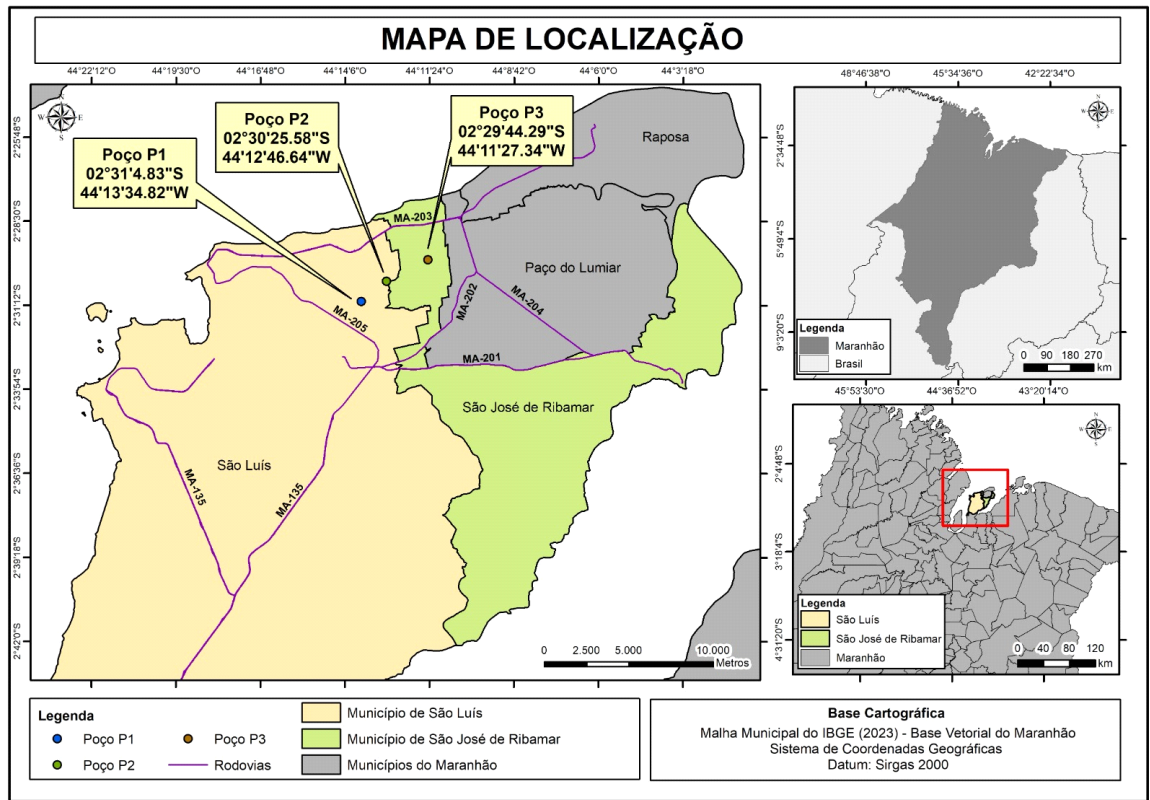
A Bacia do Paciência abrange os municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, localizados na região Nordeste do Brasil. É uma bacia intermunicipal situada entre as coordenadas geográficas 02° 25' 30" a 02° 37' 30" de Latitude Sul e 44° 07' 30" a 44° 16' 30" de Longitude Oeste. Destaca-se que o rio Paciência se encontra em constante degradação ambiental, principalmente devido ao lançamento inadequado de esgoto, em grande parte proveniente de origem doméstica. Como resultado, a qualidade da água é significativamente comprometida, o que eleva os riscos de contaminação e agrava os problemas relacionados ao saneamento básico, sobretudo no que se refere ao abastecimento público de água (ROCHA et al, 2012).

O canal do Rio Gangan tem extensão de 1.700 metros começando na Rua Aririzal e termina da Rua Pai Inácio, próximo ao bairro Turu. A urbanização acelerada tem modificado drasticamente o ambiente natural do rio, resultando em desmatamento das margens, ocupações irregulares, assoreamento e poluição por esgoto.

Para avaliar a qualidade da água subterrânea em áreas de influência do Rio Gangan, foram coletadas amostras em três diferentes poços (Figura 1) localizados nas proximidades do curso do rio. As amostras foram recolhidas em frascos esterilizados, garantindo a ausência de contaminação e evitando a formação de bolhas de ar.

Posteriormente, foram mantidas em condições semelhantes ao ambiente dos locais de coleta até serem analisadas em laboratório, em duplicata. Essa metodologia assegura a precisão dos resultados, permitindo uma análise detalhada dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água subterrânea, indispensável para compreender os impactos das atividades humanas sobre os recursos hídricos.

Figura 01- Localização dos pontos de coleta.



Fonte: Autores (2025).

3.2. Técnica de Análise dos Parâmetros

As variáveis microbiológicas analisadas foram Coliformes Totais e *Escherichia coli* e as variáveis físico-químicas foram potencial hidrogeniônico, dureza, cloretos, ferro e sólidos totais. A análise das variáveis físicas, químicas e microbiológicas foi realizada de acordo as normas estabelecidas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), conforme detalhado na Tabela 01.

Tabela 01 - Parâmetros, unidade, limite de detecção do método e método analítico.

Parâmetro	Unidade	LDM	Método Analítico
Potencial Hidrogeniônico	-	0-14	SMEWW4500-H ⁺ B
Cloretos	mg.L ⁻¹ Cl	0,5	SMEWW4500-Cl-
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	0,5	SMEWW2540C
Dureza	CaCO ₃ .L ⁻¹	0,5	SMEWW2340C
Ferro	mg.L ⁻¹	0,1	SMEWW3500 Fe
Coliformes Totais	NPM	1	SMEWW9223B
<i>Escherichia coli</i>	NPM	1	SMEWW9223B

Fonte: Modificado de Santos et al. (2020).

As comparações com os resultados obtidos foram realizadas com base na Portaria 888/21 do Ministério do Meio Ambiente, que trata dos padrões de potabilidade da água e a Resolução CONAMA 396/08 que dispõe sobre classificação e das diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.

3.3. Cálculo do Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas (IQNAS)

O IQNAS foi determinado utilizando uma escala de 0 a 100, onde valores mais altos indicam melhor qualidade da água. Essa escala foi subdividida em quatro (04) classes, onde de 0 a 25 determina as águas como padrão inaceitável, de 26 a 50 aceitável, de 51 a 75 a qualidade boa e de 76 a 100 com uma característica ótima.

Para o cálculo foi utilizada a formulação matemática do IQNAS (Equação 1), a qual foi adaptada levando em conta o Índice de Qualidade de Água Subterrânea, proposto por Oliveira et al. (2006).

Equação 01:

$$IQNAS = Produto(Q_i^{w_i}) = Q_1^{w_1} \times Q_2^{w_2} \times Q_3^{w_3} \times \dots \times Q_n^{w_n},$$

Onde:

- **IQNAS:** Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas
- **Wi:** Peso atribuído ao i-ésimo parâmetro
- **Qi:** Valor de qualidade do i-ésimo parâmetro (entre 0 e 1)
- **n:** Número total de parâmetros

O valor de Qi é obtido através de uma curva de qualidade específica para cada parâmetro. Essa curva relaciona a concentração do parâmetro com um valor entre 0 e 1, onde 1 indica a melhor qualidade. Os pesos sugeridos para cada parâmetro, conforme apresentado na Tabela 02, consideram suas influências. Nesse contexto, *Escherichia coli* recebe o maior peso (0,25), devido à sua relevância como indicador de contaminação fecal e ao seu potencial risco à saúde humana. Os pesos dos demais parâmetros foram ajustados para equilibrar sua importância no cálculo do IQNAS.

Tabela 02-Parâmetros e Pesos Sugeridos.

Parâmetro	Peso Sugerido	Justificativa
pH	0,15	Importante para a vida aquática e processos químicos
Cloreto	0,15	Influencia o sabor e a condutividade elétrica
Sólidos totais	0,15	Indica a quantidade de material sólido dissolvido
Dureza	0,15	Influencia a formação de incrustações e o sabor
Ferro	0,15	Causa manchas, altera o sabor e pode ser prejudicial à saúde
Escherichia coli	0,25	Indicador de contaminação fecal e risco à saúde

Fonte: Autores (2024).

Para cálculo do IQNAS também foi utilizado como base as equações matemáticas de qualidade versus concentração do parâmetro, adaptado de Santos et al. (2020). Para o cálculo do parâmetro *Escherichia coli*, foi atribuído o valor 1 quando a ausência foi identificada na amostra e o valor de 2 quando constatada a presença.

Tabela 03-Equações matemáticas da Qualidade versus Concentração do parâmetro.

Parâmetros e Unidades	Equações Matemáticas	Intervalos de Validade	Pesos (wi)
pH, (-)	$Q_{pH} = 1,7354 \times (pH)^2 - Q_{pH} = 16405x[(pH)^{-2,5}] - 17$	$[2 \leq pH \leq 7,34]$ $[pH \geq 7,35]$	0,15
Cloreto, (Cl,mgL ⁻¹)	$Q_{Cl} = 100$ $Q_{Cl} = 138,9x(Cl)^{-0,19561} - (Cl)^{0,42} Q_{Cl} = 0,0$	$[Cl < 4,86]$ $[4,86 \leq Cl \leq 3000]$ $[Cl > 3000]$	0,15
Sólidos Totais, (ST, mgL ⁻¹)	$Q_{ST} = 79 - 0,167284xST + EXP[(RT)^{0,228}]$ $Q_{ST} = 27,7$	$[0 \leq ST \leq 1630]$ $[ST > 1630]$	0,15
Dureza, (DUR,mgL ⁻¹)	$Q_{DUR} = 100$ $Q_{DUR} = 101,1xEXP(-0,00212x DUR)$	$[DUR < 5,4]$ $[DUR \geq 5,4]$	0,15
Ferro, (F,mgL ⁻¹)	$Q_{Fe} = Fe \times wi$	-	0,15
<i>Escherichia coli</i> , (UFC)	$Q_e = Ec \times Wi$	$Q_e \text{ (ausente)} = 1$ $Q_e \text{ (presente)} = 2$	0,25
Soma total dos pesos			1,00

Fonte: Modificado de Santos et al. (2020).

3.4. Índice de Vulnerabilidade de Aquíferos (Método GOD)

A vulnerabilidade do aquífero foi avaliada por meio da metodologia GOD, conforme descrita por Santos et al (2021) e com base no modelo proposto por Foster e Hirata (1988). Esse método considera três parâmetros físicos para gerar um índice de vulnerabilidade natural, sendo eles: G (tipo de aquífero como livre, confinado ou semiconfinado), O (litologia geral dos aquíferos, como permeabilidade e porosidade do material do aquífero) e D (profundidade do nível do lençol freático, ou seja, a distância entre a superfície do solo e o nível do aquífero).

Quadro 01-Classes de Vulnerabilidade de Aquífero.

Classes de Vulnerabilidade	Definição
Extrema	Aquíferos expostos de forma direta a potenciais contaminantes que demandam medidas de proteção imediatas.
Alta	Aquíferos com baixa proteção natural e altamente suscetíveis a potenciais contaminantes.
Moderada	Aquíferos com proteção moderada e vulnerável a alguns poluentes e somente quando lançados com frequência.
Baixa	Aquíferos com alguma proteção natural, onde a contaminação é possível, mas em ritmo lento e quando lançados de maneira contínua.
Desprezível	Aquíferos com excelentes proteções naturais, onde a contaminação é extremamente baixa.

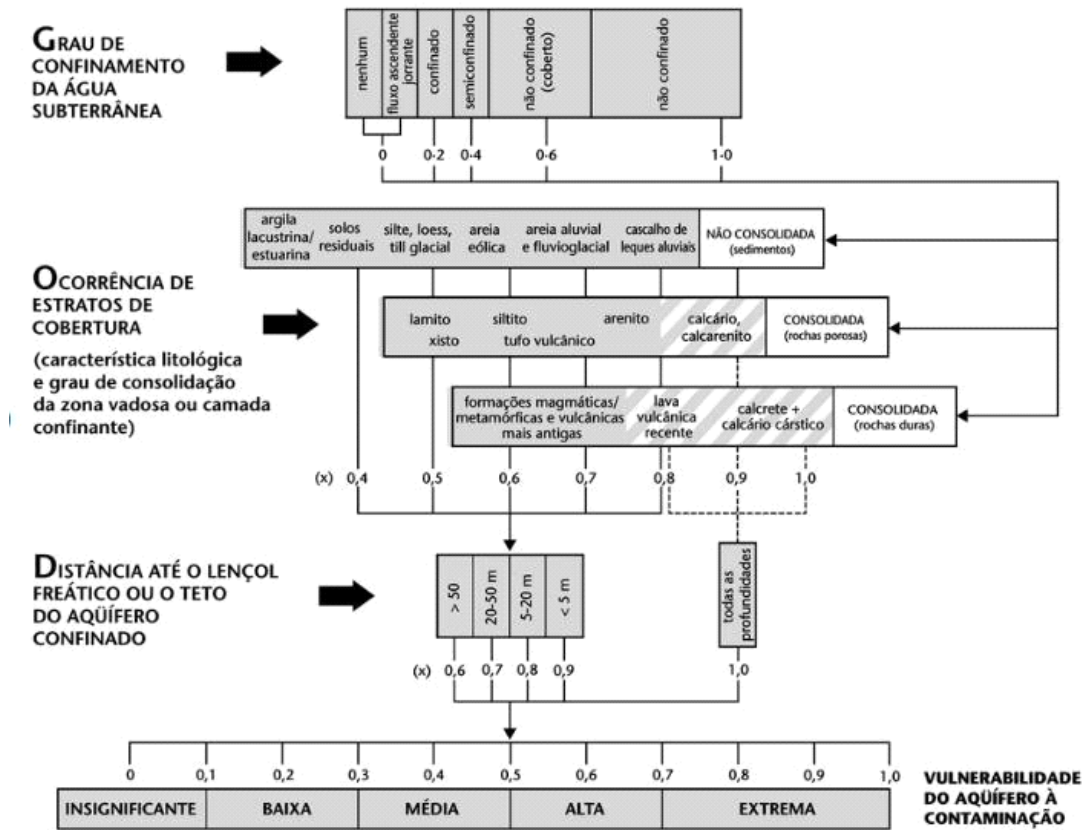
Fonte: Modificado de Santos et al. (2020).

Com o uso do método GOD, foi possível classificar a vulnerabilidade natural do aquífero em uma das cinco categorias descritas no Quadro 01: desprezível, baixa, moderada, alta ou extrema, permitindo determinar a suscetibilidade do aquífero à contaminação e a priorização de ações em áreas mais vulneráveis.

Para estabelecer o valor de referência da distância até o lençol freático (D), foram atribuídos os critérios definidos: 0,6 para profundidades acima de 50 m e 0,7 para profundidades entre 20 m e 50 m. Considerando que os poços avaliados abrangem ambas as categorias, foi calculada a média dos fatores atribuídos para representar

adequadamente a condição geral. Esse valor médio foi adotado como representativo para D.

Figura 02–Método de vulnerabilidade GOD.



Fonte: Santos et al. (2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados das análises foi possível comparar os valores obtidos das análises físico-químicas e microbiológicas com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008 e pela Portaria GM/MS nº 888/2021, além de possibilitar avaliar o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas (IQNAS) e verificar o Índice de Vulnerabilidade do aquífero.

Os resultados obtidos das amostras coletadas, seguem no Quadro 02.

Quadro 02-Comparação dos resultados das análises com a Resolução CONAMA 396/08 e Portaria Ministério da Saúde 888/21 *VMP Valor máximo permitido.

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto3	Unidade	VMP CONAMA 396/08	VMP Portaria 888/21
pH	4,65	4,20	4,13	-	Não consta	6,0 a 9,5
Dureza	18,99	18,99	18,99	mg/L CaCO ₃	Não consta	300
Cloretos	24,99	34,92	42,45	mg/L	250.000	250
Ferro	0,099	0,099	0,099	mg/L	300	0,3

Coliformes totais	Presença	Presença	Presença	NPM/100mL	Ausentes em 100ml	Ausentes em 100ml
<i>Escherichia coli</i>	Ausência	Ausência	Ausência	NPM/100mL	Ausentes em 100ml	Ausentes em 100ml
Sólidos Totais	41	100	111,5	mg/L	1.000.000	1000

Fonte: Modificado de Santos et al. (2020).

Dessa forma, é possível constatar que os resultados dos parâmetros analisados estão em conformidade com os valores máximos permitidos pela Resolução CONAMA 396/08 e com a Portaria nº 888/21 do Ministério da Saúde, com exceção do parâmetro Coliformes Totais, que foi detectado nas amostras.

A presença de coliformes totais nos pontos de análise dos poços é considerada um indicativo da possível existência de microrganismos patogênicos na água, como bactérias coliformes capazes de causar doenças (SANTOS et al., 2020). Portanto, a detecção de coliformes totais em 100 ml de amostra de água demonstra que esta não atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/08 e pela Portaria 888/21.

A partir dos dados obtidos pelas análises de amostras de água e adaptações nas formulações e parâmetros utilizados para análise, foi possível obter o Índice de Qualidade de Água Subterrânea (IQNAS). Para isso, os valores de qualidade da água subterrânea para cada parâmetro químico escolhido (Q_i) foi elevado ao peso atribuído a cada variável (w_i) em cada ponto analisado.

O Quadro 03 fornece os resultados obtidos para o IQNAS e a classificação em cada ponto.

Quadro 03-Resultado Índice de Qualidade de Água subterrânea (IQNAS).

Parâmetro	Q1	Q2	Q3	w_i	$Q_i^{w_i}$	$Q_{i2}^{w_i}$	$Q_{i3}^{w_i}$
pH	37,52	30,61	29,60	0,15	1,72242145	1,67062701	1,66224011
Dureza	97,11	97,11	97,11	0,15	1,98650468	1,98650468	1,98650468
Cloretos	70,14	64,87	61,89	0,15	1,89188557	1,86984921	1,85670571
Ferro	0,099	0,099	0,099	0,15	0,70687932	0,70687932	0,70687932
Sólidos Totais	82,44	79,69	79,06	0,15	1,93829867	1,92845973	1,92616515
<i>Escherichia coli</i>	Ausência (1)	Ausência (1)	Ausência (1)	0,25	1	1	1
IQNAS					8,8693	8,4592	8,3476
Classificação					Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável

Fonte:Modificado de Santos et al. (2020).

Dessa maneira, conforme valores obtidos no Quadro 03, o Índice de Qualidade de Água Subterrânea (IQNAS) nos três pontos foi classificado como inaceitável, o que implica na necessidade de interromper ou restringir o uso da água para consumo humano. Afinal, a presença de contaminantes em concentrações elevadas pode acarretar uma série de riscos à saúde, desde problemas gastrointestinais até doenças mais graves.

Além disso, um IQNAS insatisfatório demanda uma investigação aprofundada para identificar as causas da contaminação. As fontes podem ser diversas, incluindo atividades industriais, lançamento de esgoto doméstico ou mesmo processos naturais, como a presença de minerais específicos no subsolo.

A identificação das fontes de contaminação é importante para a implementação de medidas de remediação adequadas. Em muitos casos, a recuperação da qualidade da água

subterrânea exige a adoção de tecnologias de tratamento avançadas, como a remoção de metais pesados, pesticidas ou outros compostos orgânicos.

Para alcançar o último objetivo da pesquisa, foi realizada a análise de vulnerabilidade do aquífero utilizando o método GOD, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 04-Estimativa de índice de vulnerabilidade do aquífero.

G	O	D	Índices Finais De Vulnerabilidade
0.4	0.8	0.65	$G \times O \times D$ $0.4 \times 0.8 \times 0.65 =$ 0,208
Vulnerabilidade			Baixa

Fonte:Modificado de Santos et al. (2020).

Os poços analisados apresentaram diferentes profundidades: 60 m, 30 m e 48 m. De acordo com o Quadro 04, o tipo de ocorrência da água subterrânea (G) recebe peso 0.4 pois todos os poços possuem características de semiconfinado, já em relação às litologias do aquífero (O) o peso atribuído é 0.8 por apresentar características de arenito e calcarenito. Já a profundidade do nível do lençol freático (D) recebe o peso de 0,65, que é resultante da média dos fatores atribuídos. Considerando as profundidades entre 20 m e 50 m, para as quais é atribuído o fator 0,7, e a profundidade superior a 60 m, com fator 0,6, o valor médio obtido foi 0,65.

Assim, através do método de GOD, o resultado do cálculo apresenta classe de vulnerabilidade baixa, ou seja, é um aquífero onde a contaminação é possível, mas em ritmo lento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que os valores dos parâmetros analisados estão dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/08 e pela Portaria 888/21 do Ministério da Saúde, exceto para o parâmetro coliformes totais. A presença de coliformes totais fora dos valores estabelecidos pode ser indicativo de deficiência nas estruturas dos poços, infiltração de águas superficiais contaminadas ou proximidade de fontes de contaminação. De acordo com Menezes (2009), o indício de coliformes em águas profundas de poços pode acontecer na fase de construção, onde são cavados, porém sem vedação adequada. Isso permite que a contaminação ocorra através da infiltração de água contendo poluentes ou da proximidade de fossas sépticas, que favorece o recebimento de efluentes contaminados.

O Índice de Qualidade das Águas Subterrâneas (IQNAS) foi classificado como inaceitável nos três pontos de coleta avaliados. Esse resultado evidencia a necessidade de medidas corretivas e do monitoramento da qualidade da água, pois indica que há possibilidade de não está própria para o consumo humano. A presença de coliformes acima dos valores permitidos sugere a possível contaminação por microrganismos que podem causar doenças, o que pode ter influenciado na classificação obtida. Ademais, a água não pode ser consumida diretamente sem tratamento adequado, o que restringe seu uso.

A vulnerabilidade do aquífero foi considerada baixa. Isso indica que ele possui maior resistência a impactos ambientais e atividades humanas, garantindo maior proteção dos recursos hídricos. De acordo com Santos (2020), um aquífero com baixa vulnerabilidade só é suscetível à contaminação quando exposto a poluentes de forma

contínua e por longos períodos. Além disso, esse método é adequado para diagnósticos rápidos de vulnerabilidade, exigindo pouco detalhamento e sendo aplicado em escalas regionais (COSTA et al., 2022).

Apesar da baixa vulnerabilidade do aquífero, o IQNAS classificado como inaceitável sugere fortemente a ausência de saneamento básico adequado na região, ou então, a exposição prolongada a fontes de contaminação. A presença de coliformes fecais em todas as amostras analisadas reforça essa hipótese, evidenciando a contaminação da água subterrânea por esgoto ou outros resíduos fecais.

Dessa forma, a pesquisa possibilitou fornecer dados importantes para entender a qualidade da água subterrânea em áreas de influência do rio Gangan e identificar possíveis riscos à saúde pública. Os dados do IQNAS e da vulnerabilidade do aquífero indicam que, embora a região apresente baixa suscetibilidade à contaminação a longo prazo, a qualidade da água subterrânea nos poços analisados já está comprometida. Ampliar a amostra, incluindo mais poços e parâmetros, e avaliar a relação entre qualidade da água, saúde pública e saneamento básico são possíveis investigações para novos estudos. Essas informações podem contribuir para ações voltadas à proteção dos recursos hídricos e ao uso adequado da água subterrânea, o que auxilia na preservação da qualidade da água e na redução de impactos ambientais e de saúde na região.

REFERÊNCIAS

ABAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **O que são águas subterrâneas?**. Disponível em: <<https://www.abas.org/educacao/o-que-sao-aguas-subterraneas/#!/t5>>. Acesso em: 27 out. 2024.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20.ed. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 2012.

ATLAS ÁGUAS SEGURANÇA HÍDRICA DO ABASTECIMENTO URBANO. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/08/ANA-ATLAS-Aguas-AbastecimentoUrbano2021-compressed.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2024.

BRASIL. Conama. Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005). **Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf. Acesso em: 27 out. 2024

BRASIL. Conama. Conselho Nacional do Meio Ambiente (2008). **Resolução Conama nº 396, de 07 de abril de 2008**. Disponível em: <<https://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (Funasa) (2013). **Manual Prático de Análise de Água** (4ª Edição). Brasília: Funasa.

BRASIL. Ministério da Saúde.(2014). **Portaria GM/MS Nº 888, de 04 de Maio de 2021**. Disponível em:<<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>. Acesso em 27 out. 2024.

CASTRO, E. G. et al. **PROBLEMAS AMBIENTAIS OCASIONADOS PELOS PROCESSOS DE URBANIZAÇÃO NA MARGEM DO RIO GANGAN NO BAIRRO DO TURU, SÃO LUÍS- MA.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/XI-104.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2024.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. **Índice de qualidade da água, 2007.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wpcontent/uploads/sites/12/2013/11/Ap%C3%AAndice-C-%C3%8Dndices-de-Qualidade-das-%C3%81guas-2.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2024

CONICELLI, B.; HIRATA, R. **NOVOS PARADIGMAS NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/directbitstream/074af676-eb1e-40b3-bee8-2445d3a91088/2967226.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2024.

FERNANDES, L. V. O. **Análise de águas subterrâneas de municípios do estado do Ceará.** 2022. [s.l.]: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/66578/3/2022_tcc_lvofernandes.pdf>. Acesso em: 19 out. 2024.

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.** São Paulo: Servemar, 2006.

HIRATA, R. et al. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://igc.usp.br/igc_downloads/Hirata%20et%20al%202019%20Agua%20subterranea%20e%20sua%20importancia.pdf>.

MENEZES, J. M. **Índice de Qualidade de água subterrânea aplicado em área de aquíferos cristalinos com uso agrícola: Bacia do Rio São Domingos – RJ.** Rio de Janeiro: UFRJ/ PPGL, 2009.

MENDES, D. L. et al. **Avaliação da qualidade da água subterrânea na localidade do Sítio Canafistula em Limoeiro do Norte, CE 1.** [s.l.]: [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.unicap.br/encontrodasaguas/wp-content/uploads/2013/06/Debora-Lima-Mendes-cearaTrabalho_2073001824.pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.

OLIVEIRA, I. B.; NEGRÃO, F. I.; SILVA, A. G. L. S. Aplicação do índice de qualidade natural da água subterrânea (IQNAS) para os domínios hidrogeológicos do estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006. [Anais...]. Curitiba, PR, 2006.

PIVELI, Roque P. **CURSO: “QUALIDADE DAS ÁGUAS E POLUIÇÃO: ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS” AULA 5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS ÁGUAS: COR, TURBIDEZ, SÓLIDOS, TEMPERATURA, SABOR E ODOR.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%205%20-%20Caracteristicas%20Fisicas%20das%20Aguas.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2024.

PIVELI, Roque P. **CURSO: “QUALIDADE DAS ÁGUAS E POLUIÇÃO: ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS” AULA 6 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS ÁGUAS: pH, ACIDEZ, ALCALINIDADE E DUREZA.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%206%20-%20Alcalinidade%20e%20Acidez.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2024.

ROCHA, M. C. et al. **SANEAMENTO E QUALIDADE DAS ÁGUAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PACIÊNCIA, ILHA DO MARANHÃO, BRASIL.** Disponível em: <<https://periodicos.apps.uern.br/index.php/GEOTemas/article/view/3082/2642>>. Acesso em: 5 nov. 2024.

SAMPAIO DA COSTA, M.; DA CONCEIÇÃO RABELO GOMES, M. .; DE MORAIS NASCIMENTO, S. A. . Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 60–76, 2022. DOI: 10.21680/2447-3359.2022v8n1ID26339. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/26339>. Acesso em: 20 dez. 2024.

SANTOS, E. C. DE O. DOS et al. Análise da qualidade da água destinada ao consumo humano em comunidade rural no município de Coxim/MS. **Holos Environment**, v. 20, n. 3, p. 423–441, 8 jul. 2020.

SILVA, F. V. da; **Avaliação da Contaminação das Águas Subterrâneas Por Atividade Cemiterial na Cidade de Maceió.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2013.