



INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS MACEIÓ CURSO SUPERIOR DE LICENCIATURA
EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS



SIDNEY JOSÉ DOS SANTOS

**TENDÊNCIA TEMPORAL DOS NÍVEIS DE NITRATO COMO CONTAMINANTE
EMERGENTE NO SISTEMA AQUÍFERO BARREIRAS-MARITUBA EM MACEIÓ
(AL)**

Maceió

2025

SIDNEY JOSÉ DOS SANTOS

**TENDÊNCIA TEMPORAL DOS NÍVEIS DE NITRATO COMO CONTAMINANTE
EMERGENTE NO SISTEMA AQUÍFERO BARREIRAS-MARITUBA EM MACEIÓ
(AL)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenação do Curso de Licenciatura em
Ciências Biológicas do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas
como requisito parcial para a obtenção do título
do grau de Licenciado em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Jonas dos Santos Souza

Coorientador: Prof. Msc. Sérgio Lopes da
Silva

Maceió

2025

FICHA CATALOGRÁFICA



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Maceió
Biblioteca Benevides Monte

551.49

S237t

Santos, Sidney José dos.

Tendência temporal dos níveis de nitrato como contaminante emergente no sistema aquífero Barreiras-Marituba em Maceió (AL) [recurso eletrônico] / Sidney José dos Santos. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 1,59 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Prof. Dr. Jonas dos Santos Souza.

Coorientação: Prof. Me. Sérgio Lopes da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, Maceió, 2025.

1. Ciências Biológicas. 2. Metemoglobinemia. 3. Cianose. 4. Nitrato – Contaminante emergente. 5. Águas Subterrâneas. I. Título.


Franciane Monick Gomes de França
Bibliotecária – CRB 4/1831

SIDNEY JOSÉ DOS SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do título do grau de Licenciado em Ciências Biológicas.


Aprovado em 18 de dezembro de 2025.

Orientador


 Documento assinado digitalmente
JONAS DOS SANTOS SOUSA
Data: 19/02/2026 13:17:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jonas dos Santos Sousa - IFAL / Campus Maceió

Banca Examinadora

 Documento assinado digitalmente
ALAN JOHN DUARTE DE FREITAS
Data: 21/02/2026 15:34:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Alan John Duarte de Freitas – IFAL / Campus Maceió

 Documento assinado digitalmente
DEMETRIUS PEREIRA MORILLA
Data: 19/02/2026 13:28:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

MSc. Demetrius Pereira Morilla – IFAL / Campus Maceió

Maceió, AL

2025

*Dedico este trabalho a todos que me ajudaram
a enxergar o horizonte de conhecimento além
do que os meus olhos podiam ver e aos
amantes da arte de ensinar.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus o meu orientador por excelência que me ajudou em toda minha trajetória até o final deste curso.

A minha esposa Daniely pela paciência, cuidado e apoio, e ao Levi meu primogênito que algumas vezes me acompanhou no campus.

Ao meu orientador por ter aceito o desafio de me orientar e partilhar seu conhecimento e ciência.

Ao meu coorientador e amigo Dr. Sérgio Lopes por aceitar o convite de coorientar a nossa pesquisa.

Aos meus colegas de classe que compartilharam comigo as vitórias e as dificuldades, em especial, Sara Cristine e Maria Angélica.

Ao Instituto Federal de Alagoas (IFAL).

Aos professores que dedicaram parte de suas vidas para transmitir seus conhecimentos e permitir que eu fosse protagonista do meu aprendizado. Em especial aos professores Fábio Calazans, Karina Dias e Joeferson Reis que nos bastidores estavam nos orientando.

Ao Laboratório Central Analítica, aos professores Celso Caldas e Johnnatan Duarte pelos direcionamentos nas pesquisas.

Ao Grupo de Síntese, Análises Químicas e Caracterização de Materiais (GSAQCM).

Aos meus irmãos em Cristo que me ajudaram em oração.

“Se atentamente ouvires a voz do Senhor, teu Deus, tendo cuidado de guardar todos os seus mandamentos que hoje te ordeno, o Senhor, teu Deus, te exaltará sobre todas as nações da Terra.”

Deuteronômio 28.1

RESUMO

A qualidade de vida está ligada diretamente aos nossos hábitos alimentares, dentre eles a ingestão de líquidos. Quando se trata da ingestão de líquidos é importante que esteja livre de qualquer contaminante seja ele químico ou biológico. A ingestão de água com concentrações de nitrato acima dos limites estabelecidos pode acarretar efeitos adversos à saúde humana. Entre esses efeitos destaca-se a metemoglobinemia, também conhecida como (síndrome do bebê azul), condição que ocorre em decorrência da oxidação do ferro da hemoglobina do estado ferroso (Fe^{2+}) para o estado férrico (Fe^{3+}), resultando na formação de metemoglobina, a qual é incapaz de transportar oxigênio de forma eficiente. Essa alteração compromete a oxigenação dos tecidos, podendo provocar sintomas como cansaço, cefaleia e dispneia. Além disso, a exposição crônica ao nitrato tem sido associada ao aumento do risco de câncer gástrico, em função da formação endógena de compostos N-nitrosos (nitrosaminas) com potencial carcinogênico no trato gastrointestinal. Este estudo teve como objetivo monitorar as concentrações de nitrato (NO_3^- -N) nas águas subterrâneas do sistema aquífero Barreiras-Marituba, em Maceió (AL), no período de 2022 a 2025, com base em dados laboratoriais e análises estatísticas, verificando a conformidade dos resultados com os limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Os resultados indicaram que o sistema aquífero Barreiras-Marituba, em Maceió (AL), apresenta diferentes graus de contaminação por nitrato, com concentrações mais elevadas e persistentes na parte baixa da cidade, variando de 10,65 a 46,86 (mg NO_3^- - N/L), e valores moderados, porém crescentes, na parte alta, entre 4,20 e 26,70 (mg NO_3^- - N/L). Parte significativa das amostras ultrapassou o limite de 10 (mg NO_3^- - N/L) estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, evidenciando a influência de fontes antrópicas associadas à deficiência do saneamento básico. Os resultados indicam risco à saúde pública, especialmente pelo potencial de ocorrência de metemoglobinemia e câncer gástrico, e reforçam a necessidade de ações permanentes de educação ambiental e melhoria do saneamento como estratégias alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: nitrato; contaminante emergente; águas subterrâneas; metemoglobinemia; ODS.

ABSTRACT

Quality of life is directly related to dietary habits, including fluid intake. In this context, it is essential that drinking water be free from chemical and biological contaminants. The ingestion of water containing nitrate concentrations above established limits may cause adverse effects on human health. Among these effects, methemoglobinemia—also known as blue baby syndrome—stands out. This condition occurs due to the oxidation of hemoglobin iron from the ferrous state (Fe^{2+}) to the ferric state (Fe^{3+}), resulting in the formation of methemoglobin, which is unable to efficiently transport oxygen. This alteration compromises tissue oxygenation and may lead to symptoms such as fatigue, headache, and shortness of breath. In addition, chronic exposure to nitrate has been associated with an increased risk of gastric cancer due to the endogenous formation of potentially carcinogenic N-nitroso compounds (nitrosamines) in the gastrointestinal tract. This study aimed to monitor nitrate (NO_3^- -N) concentrations in groundwater from the Barreiras–Marituba aquifer system in Maceió, Alagoas State, Brazil, between 2022 and 2025, based on laboratory data and statistical analyses, and to assess compliance with the limits established by Brazilian Ministry of Health Ordinance GM/MS No. 888/2021. The results indicated that the Barreiras–Marituba aquifer system exhibits different degrees of nitrate contamination, with higher and persistent concentrations in the lower part of the city, ranging from 10.65 to 46.86 mg NO_3^- -N/L, and moderate but increasing values in the upper part, between 4.20 and 26.70 mg NO_3^- -N/L. A significant proportion of the samples exceeded the maximum permissible limit of 10 mg NO_3^- -N/L, evidencing the influence of anthropogenic sources associated with inadequate sanitation infrastructure. These findings indicate a risk to public health, particularly due to the potential occurrence of methemoglobinemia and gastric cancer, and reinforce the need for permanent environmental education actions and sanitation improvements as strategies aligned with the Sustainable Development Goals.

Keywords: nitrate; emerging contaminant; groundwater; methemoglobinemia; SDGs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do Ciclo do Nitrogênio.....	17
Figura 2 - Fontes de contaminação de águas subterrâneas por nitrato.....	20
Figura 3 - Mapa geolocalização de Maceió-Alagoas.....	23
Figura 4 - Mapa geolocalização dos pontos de amostragem.....	24

LISTA DE TABELAS (opcional)

Tabela 1 - Evolução temporal dos níveis de nitrato (NO_3^- -N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba (parte baixa de Maceió – AL) entre 2022 e 2025.....	26
Tabela 2 - Evolução temporal dos níveis de nitrato (NO_3^- -N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba (parte baixa de Maceió – AL) entre 2022 e 2025.....	29
Tabela 3 - Faixa de variação, tendência temporal e situação geral dos teores de nitrato (NO_3^- -N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba nas partes baixa e alta de Maceió (AL) entre 2022 e 2025.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS (opcional)

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SMEWW – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

NO_3^- – Nitrato

NO_2^- – Nitrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1	AQUÍFERO BARREIRA MARITUBA.....	15
3.2	PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021.....	15
3.3	CICLO DO NITROGÊNIO.....	16
3.4	NITRATO (NO ₃ ⁻).....	17
3.5	NITRITO (NO ₂ ⁻).....	18
3.6	EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS.....	18
3.7	MÉTODOS PARA REMOÇÃO DE NITRATO NA ÁGUA.....	19
3.8	EDUCAÇÃO AMBIENTAL E OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)	20
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1	LOCAL.....	21
4.2	COLETA DE DADOS.....	21
4.3	ESCOLHA DOS BAIRROS.....	22
4.4	A AMOSTRAGEM.....	23
4.5	MÉTODO ANALÍTICO.....	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
6	CONCLUSÕES.....	32
	REFERÊNCIAS.....	33
	ANEXO.....	38

1 INTRODUÇÃO

A capital alagoana, Maceió, está localizada na região Nordeste do Brasil, a 9°40' sul e 38°37' oeste, e possui uma área total de aproximadamente 500 km², com 212 km² de área urbana, conforme dados do IBGE.

A principal fonte de água subterrânea da capital alagoana é o sistema aquífero Barreiras-Marituba, uma importante fonte de água que abastece Maceió e região metropolitana. Segundo os estudos feitos pela agência nacional de águas (ANA, 2011), existe ameaça de degradação no aquífero Barreira-Marituba, cujos principais impactos apontados são: a disposição de esgoto nos sistemas de drenagem urbana; sistemas de saneamento como fossas e sumidouros; cemitérios; postos de gasolinas e a fertirrigação da cana-de-açúcar, que ocorre geralmente nas periferias da zona urbana de Maceió.

A degradação das águas subterrâneas em áreas urbanas está diretamente relacionada às ações antrópicas, sobretudo ao descarte inadequado de resíduos domésticos e à deficiência no saneamento básico. A presença de fossas rudimentares e o lançamento de esgotos sem tratamento favorecem a infiltração de contaminantes no solo e a lixiviação para o lençol freático. Em aquíferos livres e altamente permeáveis, esses processos são intensificados, configurando poluição difusa persistente e risco à saúde pública (ANA, 2011; VON SPERLING, 2014).

O consumo crônico de água com concentrações elevadas de nitrato tem sido associado a riscos relevantes à saúde pública: epidemiologias e meta-análises recentes descrevem correlação positiva entre exposição prolongada ao nitrato na água potável e aumento do risco de câncer gástrico, devido à formação de compostos N-nitrosos a partir da redução do nitrato a nitrito no trato gastrointestinal (PICETTI et al., 2022; SEYYEDSALEHI et al., 2023). Ademais, o nitrito formado a partir do nitrato pode desencadear metemoglobinemia em lactantes e vulneráveis (SCHROEDER et al., 2020).

A intensificação da ocupação urbana e a precariedade do saneamento básico em Maceió têm contribuído para a degradação da qualidade das águas subterrâneas do aquífero Barreiras-Marituba. A contaminação por nitrato representa um risco à saúde pública, estando associada à metemoglobinemia e ao câncer gástrico. Dessa forma, o estudo justifica-se pela necessidade de monitorar esse contaminante e subsidiar ações de gestão e proteção dos recursos hídricos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esse estudo teve como objetivo monitorar as concentrações da contaminação por nitrato (NO_3^- -N) nas águas subterrâneas do sistema aquífero Barreiras-Marituba, em Maceió (AL), entre 2022 e 2025, e verificar sua conformidade com os limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar as concentrações de nitrato nas partes alta e baixa de Maceió;
Comparar os resultados com o limite máximo de 10 mg NO_3^- -N/L estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021;
- ✓ Analisar a tendência temporal da contaminação no período de estudo;
- ✓ Relacionar os resultados às possíveis fontes antrópicas, como fossas e deficiência no saneamento;
- ✓ Indicar medidas de controle e mitigação dos riscos à saúde pública;
- ✓ Gerar subsídios para novas pesquisas;
- ✓ Orientar políticas públicas de gestão de recursos hídricos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aquífero Barreira Marituba

A principal fonte de água subterrânea da capital alagoana é o sistema aquífero Barreiras-Marituba uma importante fonte de água que abastece Maceió e região metropolitana. Segundo os estudos feitos pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2011^a), existe ameaça de degradação no aquífero Barreira-Marituba, cujos principais impactos apontados são: a disposição de esgoto nos sistemas de drenagem urbana; sistemas de saneamento como fossas e sumidouros; cemitérios; postos de gasolinas e a fertirrigação da cana-de-açúcar, que ocorre geralmente nas periferias da zona urbana de Maceió.

O Sistema Aquífero Barreiras–Marituba está inserido na Bacia Sedimentar de Alagoas–Sergipe, estendendo-se ao longo da faixa costeira dos estados de Alagoas e Sergipe, no Nordeste do Brasil. Em Maceió (AL), esse sistema constitui a principal fonte de abastecimento de água subterrânea, sendo formado por sedimentos terciários e quaternários das formações Barreiras e Marituba, com elevada importância hidrogeológica para o suprimento urbano, industrial e agrícola da região (ELIS; BARROSO; KIANG, 2004; ROCHA, 2005).

O Sistema Aquífero Barreiras está ameaçado de degradação devido à expansão urbana, onde os efeitos mais impactantes estão concentrados na drenagem que funciona como rede coletora do esgoto urbano, sistema de saneamento com deposição in situ de efluentes domésticos (fossas e sumidouros) e da ocupação desordenada do terreno. Ainda pode-se citar em menor escala para esta degradação, os cemitérios, postos de gasolina, a fertirrigação da monocultura da cana-de-açúcar na periferia da zona urbana, etc. Marituba, representa o principal manancial hídrico subterrâneo na região de Maceió, e vem sendo amplamente explorado para abastecimento público, privado e industrial. A Formação Barreiras é aflorante em quase toda a Região Metropolitana de Maceió, sob a forma de extensos tabuleiros costeiros. (ANA, 2011^a).

3.2 Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021

Segundo a Portaria GM/MS n° 888/2021 (Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5/2017), define-se água para consumo humano como “água potável destinada à ingestão, preparação de alimentos e à higiene pessoal, independentemente da sua origem”; água

potável como aquela que atende aos padrões de potabilidade e não oferece riscos à saúde; padrão de potabilidade como o conjunto de limites permitidos para parâmetros de qualidade da água; e padrão organoléptico como aqueles parâmetros que afetam aceitação sensorial, sem necessariamente risco à saúde. — (Brasil, 2021).

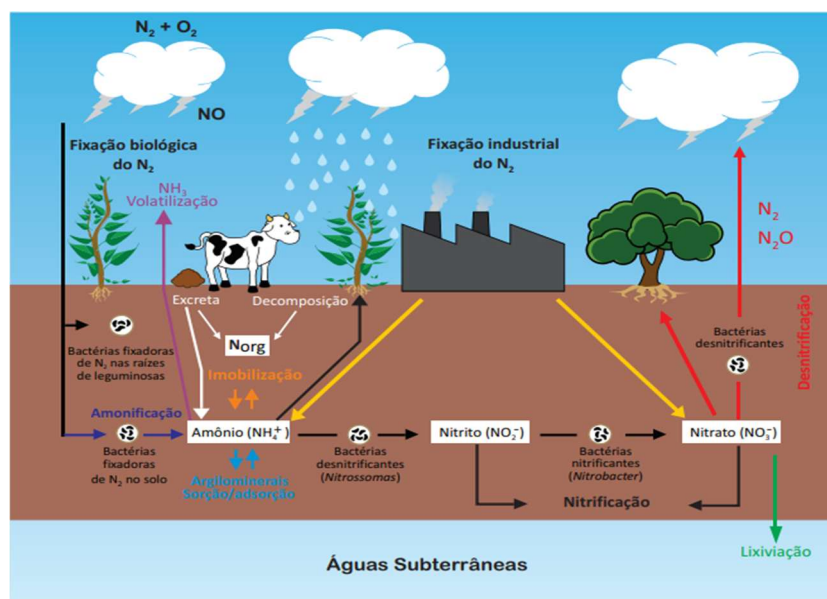
A Portaria GM/MS nº 888/2021 altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5/2017, dispondo sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021).

Com a nova norma, amplia-se a responsabilidade dos gestores dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) e Sistemas Alternativos de Abastecimento de Água (SAC), que devem implementar não apenas monitoramentos, mas práticas preventivas de vigilância da água ao longo de toda a rede, desde a captação até o ponto de consumo SOUZA, 2023).

3.3 Ciclo do Nitrogênio

O ciclo do nitrogênio é um dos principais processos biogeoquímicos da Terra, responsável por transformar o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis por organismos vivos, sustentando a produtividade dos ecossistemas.” (SOUSA; FERNANDES; LIMA, 2021). A (Figura 1) apresenta um esquema didático para o entendimento do das fases do ciclo do nitrogênio.

Figura 1 - Ciclo do Nitrogênio



Fonte: Adaptado de São Paulo 2011

A conversão entre diferentes formas de nitrogênio — amônia, nitrito e nitrato — ocorre por meio de processos microbianos como nitrificação e desnitrificação, que regulam a disponibilidade de nutrientes e a qualidade da água.” (ZHANG et al., 2020). A compreensão do ciclo do nitrogênio é essencial para a gestão da qualidade da água, pois desequilíbrios nesse ciclo podem levar à eutrofização, toxicidade por amônia e contaminação por nitrato.” (BRITO; SANTOS; MENDES, 2022).

3.4 Nitrato (NO_3^-)

O nitrato (NO_3^-) provém da combinação química entre nitrogênio e oxigênio, podendo estar presente no ar, no solo, nas águas superficiais e subterrâneas. Normalmente, é encontrado em ambientes rurais com uso intensivo de fertilizantes agrícolas e em cidades com um mal planejamento, estando relacionado a resíduos domésticos, dejetos humanos provenientes de esgoto e fossas sépticas, fezes de animais, oxidação de amônia e condições meteorológicas (BREUER, ET AL, 2008; BAIRD E CANN, 2011; HAMIDI, ET AL, 2023).

O aumento das concentrações de nitrato em águas subterrâneas tem sido amplamente associado ao uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, bem como à infiltração de efluentes domésticos e industriais, caracterizando importantes fontes antrópicas de contaminação dos aquíferos (WARD et al., 2018). Em água destinada ao consumo humano, o nitrato é um contaminante químico relevante, pois sua ingestão em excesso pode causar metemoglobinemia, especialmente em lactentes (WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO, 2017).

A exposição crônica a elevadas concentrações de nitrato pode estar associada à formação endógena de compostos N-nitrosos, com potencial carcinogênico.” (SCHROEDER et al., 2020)

A Portaria GM/MS nº 888/2021 define o Valor Máximo Permitido (VMP) de 10 mg/L de nitrogênio na forma de nitrato (equivalente a 45 mg/L de NO_3^-), em conformidade com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde.” (BRASIL, 2021).

3.5 Nitrito (NO_2^-)

O nitrito (NO_2^-) é uma forma intermediária do nitrogênio inorgânico, produzido durante os processos de nitrificação (oxidação da amônia) e desnitrificação (redução do nitrato), desempenhando papel essencial na ciclagem do nitrogênio em ambientes aquáticos e terrestres (BARNES; CLEMENS, 2021).

A presença de nitrito em águas naturais é geralmente transitória, pois o composto é rapidamente oxidado a nitrato ou reduzido a formas gasosas de nitrogênio sob condições anaeróbias (WRAGE-MÖNNIG et al., 2018).

Do ponto de vista sanitário, o nitrito é considerado um contaminante químico de relevância, pois pode provocar meta-hemoglobinemia e participar da formação de compostos N-nitrosos potencialmente carcinogênicos (WHO, 2017; SCHROEDER et al., 2020). No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece o limite máximo de 1,0 mg/L de nitrogênio como nitrito, em consonância com as recomendações da Organização Mundial da Saúde, reforçando sua importância no controle da qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2021; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022).

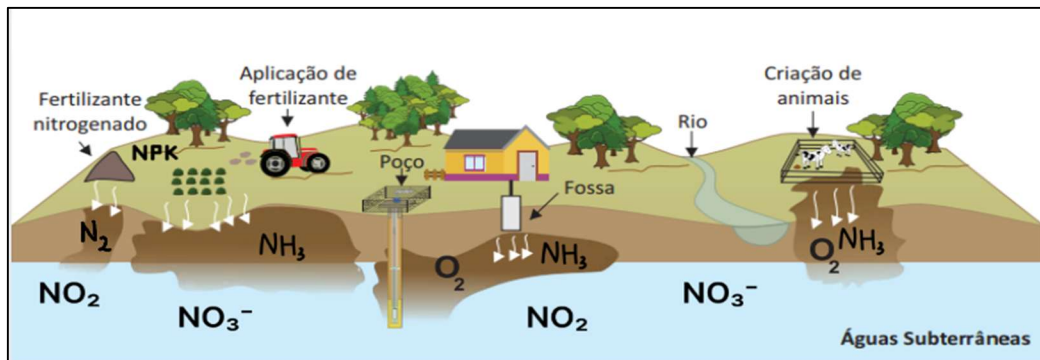
3.6 Emissões Antropogênicas

A contaminação das águas subterrâneas põe em risco não apenas a saúde da população local, como também dificulta o desenvolvimento socioeconômico com uma visão mais sustentável de uma cidade ou região. A maioria desses poluentes são gerados nas redes de esgoto no subsolo, principalmente aquelas com falta de manutenção, construção de aterros sanitários em terrenos inapropriados e do acúmulo de lixo domésticos e industriais sem uma coleta adequada, problemas comuns de cidades que apresentam uma rápida urbanização e sem um planejamento adequado (WANG, et al, 2023).

Outro fator de poluição ligado diretamente a contaminação dos aquíferos são os locais de disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), que com o aumento gradativo das cidades e da população, tornaram-se comuns no espaço urbano. Porém, normalmente, esta disposição não é planejada adequadamente, não contando com um projeto de engenharia adequado e um controle ambiental, produzindo quantidades significativas de chorume e gases poluentes (SINGH, et al, 2008; MORITA, et al, 2021).

Estudos comprovam que essas fossas atuam como uma das principais fontes de poluição de aquíferos rasos no espaço urbano, com a liberação de metais, nitrato e a redução do oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas, infiltrando-se através do solo (KATZ, EBERTS e KAUFFMAN, 2011; GIL MARQUES, et al, 2019).

Figura 2 - Fontes de contaminação de águas subterrâneas por nitrato



Fonte: Adaptado de São Paulo 2011

O nitrato (NO_3) provém da combinação química entre nitrogênio e oxigênio, podendo estar presente no ar, no solo, nas águas superficiais e subterrâneas. Normalmente, é encontrado em ambientes rurais com uso intensivo de fertilizantes agrícolas e em cidades com um mal planejamento, estando relacionado a resíduos domésticos, dejetos humanos provenientes de esgoto e fossas sépticas, fezes de animais, oxidação de amônia e condições meteorológicas (BREUER, ET AL, 2008; BAIRD E CANN, 2011; HAMIDI, ET AL, 2023). A (Figura 4) exemplifica como a ação antrópica influencia no aumento das concentrações de nitrato na água.

3.7 Métodos para remoção de nitrato na água

Atualmente existem algumas alternativas que promovem a remoção do nitrato a níveis aceitáveis na água, como a troca iônica. A troca iônica com resinas aniônicas é uma tecnologia madura e amplamente utilizada para remoção de nitrato em águas subterrâneas e abastecimento público, sendo economicamente preferida em muitos sistemas de pequena a média escala (KHERA et al., 2021; COSTA, 2022). Além da troca iônica a osmose reversa (RO) apresenta elevada eficiência na remoção de NO_3^- (frequentemente $>90\%$), porém implica maior consumo energético, necessidade de pré-tratamento e geração de uma corrente concentrada de rejeitos que requer disposição adequada (ZEGGAR et al., 2023; WHO, 2017).

Tecnologias emergentes, como eletrosorção e membranas funcionais, mostram potencial para reduzir consumo energético e aumentar seletividade para NO_3^- , representando caminhos promissores para tratamentos híbridos no futuro próximo. (TSAI et al., 2024).

3.8 Educação Ambiental e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A implementação de ações permanentes de educação ambiental constitui uma estratégia fundamental para a conscientização da população acerca da importância da proteção das águas subterrâneas, especialmente em áreas urbanas sujeitas à pressão antrópica. A compreensão dos processos de contaminação, associada ao uso inadequado de sistemas de esgotamento sanitário, permite que a sociedade reconheça seu papel na preservação dos aquíferos, contribuindo para a prevenção da degradação da qualidade da água e para a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos (UNESCO, 2015; WHO, 2017).

Nesse contexto, programas educativos contínuos voltados à correta implantação, operação e manutenção de sistemas de esgotamento sanitário, bem como à substituição de fossas rudimentares por soluções tecnicamente adequadas, configuram-se como medidas eficazes de mitigação da contaminação das águas subterrâneas. A adoção de práticas sanitárias seguras reduz significativamente a carga de contaminantes químicos, como o nitrato, minimizando riscos à saúde pública e fortalecendo a gestão preventiva dos recursos hídricos (BRASIL, 2021; WHO, 2017).

Essas ações estão diretamente alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial ao ODS 3 – Saúde e Bem-Estar, ao reduzir a exposição da população a contaminantes associados a doenças como metemoglobinemia e câncer gástrico, e ao ODS 6 – Água Potável e Saneamento, ao promover a melhoria da qualidade da água e o acesso a sistemas de saneamento seguros e sustentáveis (ONU, 2015). A educação ambiental, nesse sentido, atua como instrumento integrador entre saúde pública, saneamento e proteção ambiental.

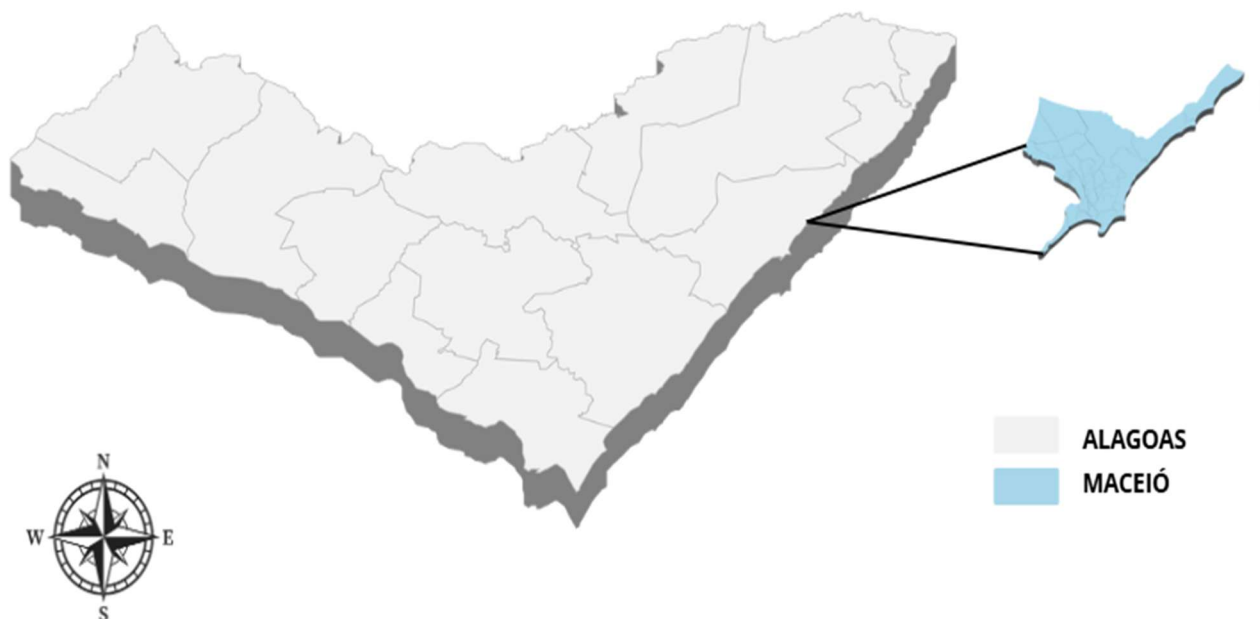
Adicionalmente, a promoção de práticas educativas voltadas ao planejamento urbano e ao uso responsável do solo contribui para o alcance do ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, ao incentivar modelos de ocupação urbana compatíveis com a preservação dos aquíferos. A articulação entre poder público, instituições de ensino e sociedade civil é essencial para consolidar uma cultura de responsabilidade ambiental, fortalecendo políticas públicas que assegurem a proteção das águas subterrâneas e a qualidade de vida das populações urbanas (ONU, 2015; UNESCO, 2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local

Maceió, capital de Alagoas, está localizada na região Nordeste do Brasil e possui uma área de 509,320 km². É a cidade mais populosa do estado, com uma densidade demográfica de 1.880,77 habitantes por km², segundo o Censo de 2022. Maceió ocupa uma porção significativa do território alagoano, sendo o município mais populoso, e sua área corresponde a aproximadamente 1,8% do estado. Maceió está situada na costa atlântica do estado de Alagoas, com coordenadas geográficas de Latitude: 09°41'00" S e Longitude: 35°43'00" O.

Figura 3 - Mapa da geolocalização de Maceió-AL.



Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

4.2 Coleta de dados

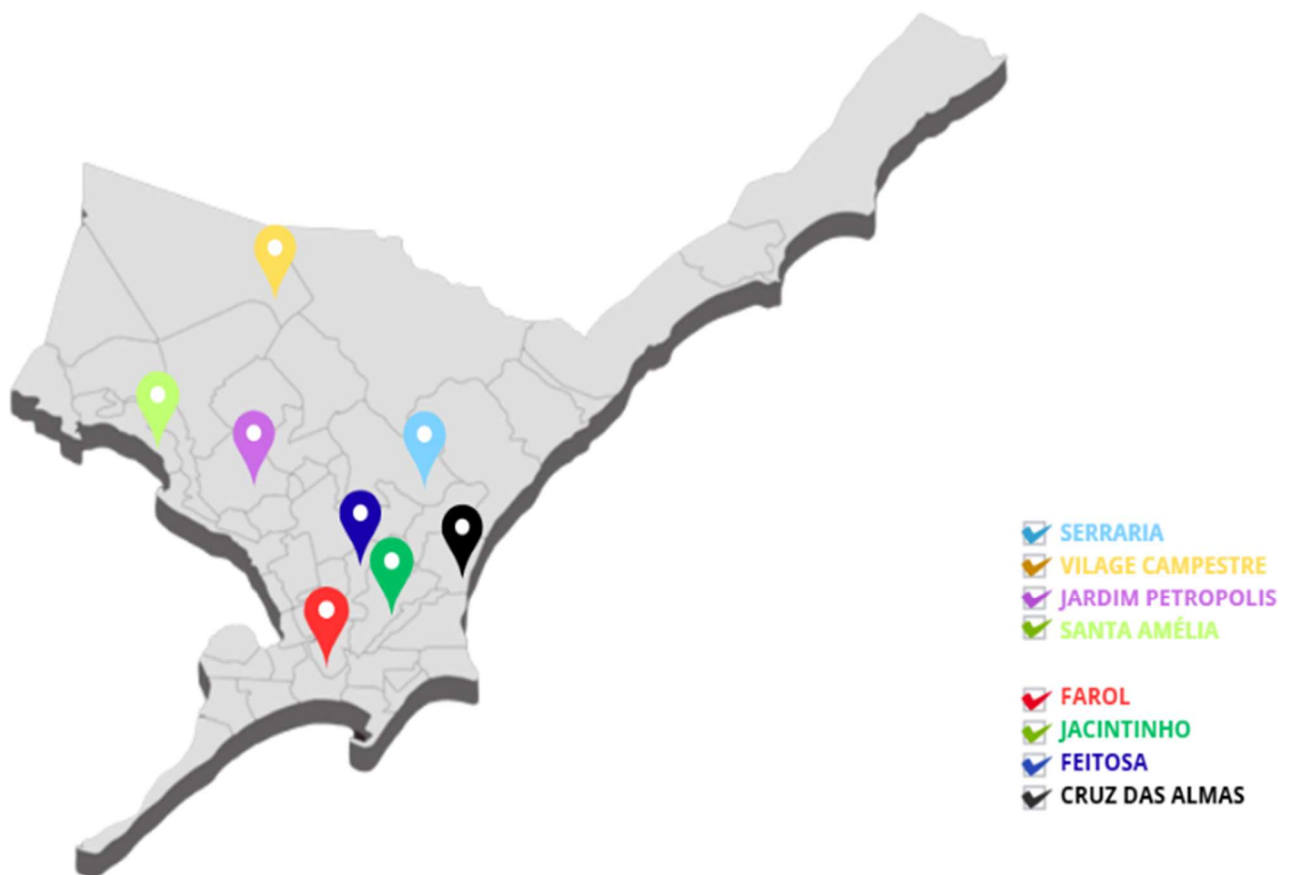
Os dados utilizados na análise estatística deste estudo foram obtidos a partir do banco de dados de um laboratório de análises químicas localizado na capital alagoana e disponibilizados para fins exclusivamente acadêmicos, mediante autorização institucional, em

estrita observância aos princípios de confidencialidade, sigilo e proteção das informações dos clientes conforme anexo I. A determinação do nitrato foi realizada de acordo com os procedimentos recomendados pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater e em conformidade com os requisitos da norma ISO/IEC 17025.

4.3 Escolha dos Bairros

Os bairros foram selecionados de forma estratégica com base na identificação de concentrações de nitrato em desconformidade com o valor máximo permitido estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, priorizando as áreas que apresentaram os maiores níveis de não conformidade.

Figura 4 - Mapa da geolocalização dos pontos de amostragem.



Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

4.4 A amostragem

A amostragem foi conduzida em conformidade com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017, que dispõe sobre a competência de laboratórios de ensaio e calibração, observando-se, adicionalmente, as diretrizes da ABNT NBR 9898:2021, referentes à preservação e às técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores, bem como da ABNT NBR 15784:2010, aplicável à amostragem de águas subterrâneas. Os pontos de coleta corresponderam a poços artesianos, sendo as amostras coletadas diretamente na saída do poço, antes de qualquer etapa de tratamento, caracterizando-se, portanto, como água bruta.

4.5 Método Analítico

A análise de todas as amostras foi realizada em conformidade com as recomendações estabelecidas pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e pelo método SMEWW 4110 B, denominado Determination of Anions by Ion Chromatography, descrito no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados da (Tabela 1), referente aos dados encontrados na parte baixa de Maceió evidencia valores significativamente elevados de nitrato (NO_3^- - N) em todos os pontos monitorados entre 2022 e 2025. As concentrações variaram amplamente entre 10,650 mg/L e valores superiores a 44,490 mg/L, ultrapassando o limite máximo permitido para água destinada ao consumo humano definido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece 10 (mg NO_3^- - N/L) de nitrogênio na forma de nitrato (NO_3^- - N) (BRASIL, 2021).

Tabela 1 - Evolução temporal dos níveis de nitrato (NO_3^- - N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba (parte baixa de Maceió – AL) entre 2022 e 2025.

BAIRROS MACEIÓ PARTE BAIXA	N (mg NO_3^- -N/L)	N (mg NO_3^- -N/L)	N (mg NO_3^- -N/L)	N (mg NO_3^- -N/L)
	2022	2023	2024	2025
FAROL				
P1 - 9°66'34.1"S - 35°73'37.9"W	05/09 14,312	13/07 20,470	26/09 21,070	11/09 16,340
P2 - 9°64'54.3"S - 35°72'55.4"W	23/02 14,939	0000	05/03 15,160	15/10 12,41
CRUZ DAS ALMAS				
P1 - 9°38'01.2"S - 35°42'08.0"W	06/04 12,098 14 /11 18,869	26/01 18,094 24/08 21,530	-	22/04 22,510 02/06 19,170
P2 - 9°37'56.1"S - 35°42'18.4"W	-	-	19/12 10,650	18/03 14,420
FEITOSA				
P1 - 9°38'15.3"S - 35°43'32.9"W	25/03 22,494	09/05 23,814	02/09 19,650	11/02 19,760
JACINTINHO				
P1 - 9°38'32.6"S - 35°42'45.2"W	07/11 > 25	26/12 > 25	03/01 46,860	30/06 44,490

Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

No bairro Farol, os pontos P1 e P2 apresentaram variação de 14,312 (mg NO_3^- - N/L) (2022) para 21,070 (mg NO_3^- - N/L) (2024), seguida por uma leve redução para 16,340 (mg NO_3^- - N/L) em 2025, indicando uma flutuação interanual com tendência geral de aumento. Essa elevação pode estar associada ao aumento da densidade populacional e à expansão imobiliária, o que intensifica a infiltração de efluentes domésticos nos aquíferos livres, um comportamento já descrito por Lima et al. (2018) em estudos sobre o Aquífero Barreiras em áreas urbanizadas do Nordeste.

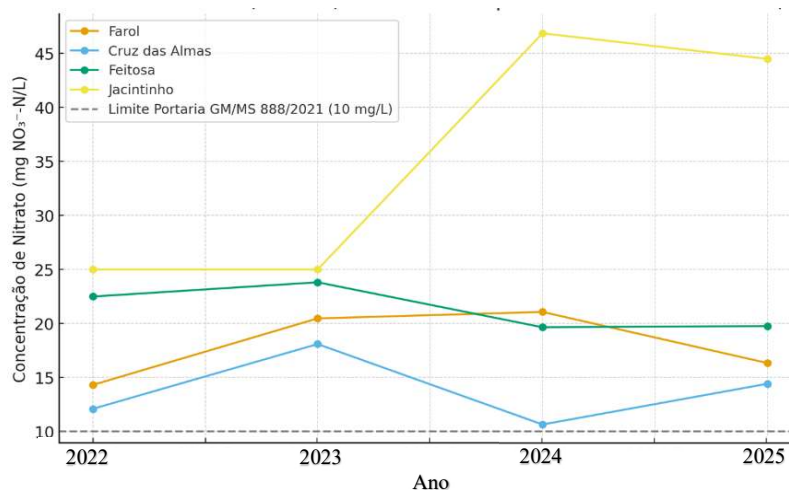
Em Cruz das Almas, observou-se um padrão semelhante: concentrações de 12,098 (mg NO_3^- - N/L) em 2022, atingindo 21,530 (mg NO_3^- - N/L) em 2023, com redução em 2025 14,420 (mg NO_3^- - N/L). A oscilação pode refletir tanto variações sazonais nas taxas de recarga quanto flutuações na contribuição de fontes difusas, como vazamentos de fossas sépticas ou infiltração de águas residuárias. Segundo Pacheco et al. (2019), a dinâmica temporal do nitrato em sistemas

aquíferos costeiros é fortemente influenciada pelo regime de chuvas e pela permeabilidade do solo, o que explica a variabilidade observada.

O bairro Feitosa apresentou valores persistentemente elevados em todos os anos analisados, variando entre 22,494 e 23,814 (mg NO₃⁻- N/L), com pequena queda para 19,760 (mg NO₃⁻- N/L) em 2025, mantendo-se, entretanto, acima do limite de potabilidade. Estudos hidrogeológicos na Região Metropolitana de Maceió demonstram que as concentrações de nitrato nas águas subterrâneas frequentemente excedem o limite de potabilidade estabelecido (10 mg NO₃⁻-N/L), sendo indicativo de contaminação associada a atividades antrópicas e insuficiente saneamento básico (GOMES et al., 2017; FAZZIO et al., 2011).

No bairro Jacintinho, as concentrações de nitrato foram as mais elevadas de todo o período, ultrapassando 25 (mg NO₃⁻- N/L) em 2022 e 2023, e atingindo 46,860 (mg NO₃⁻- N/L) em 2024 e 44,490 (mg NO₃⁻- N/L) em 2025. Esses valores configuram níveis críticos de contaminação, que podem representar riscos à saúde pública, especialmente relacionados à síndrome da “metemoglobinemia infantil” (BRASIL, 2021; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2017). De acordo com Foster e Chilton (2018), concentrações acima de 10 (mg NO₃⁻- N/L) indicam uma forte influência antrópica, com contribuição dominante de fontes domésticas não tratadas.

Gráfico 1 - Evolução temporal dos níveis de nitrato (NO₃⁻- N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba (parte baixa de Maceió – AL) entre 2022 e 2025.



Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

De modo geral, a tendência temporal (2022–2025) apresentada no (Gráfico 1), demonstra persistência e intensificação dos níveis de nitrato em diversos pontos do sistema aquífero Barreiras-Marituba. Essa tendência é consistente com estudos realizados em aquíferos

costeiros de regiões tropicais, nos quais a pressão urbana e a ausência de redes de esgoto adequadas favorecem a percolação de compostos nitrogenados (CARVALHO et al., 2022).

A persistência de valores elevados, mesmo com eventuais reduções pontuais, sugere que o sistema Barreiras-Marituba apresenta baixa capacidade de autodepuração e alta vulnerabilidade à contaminação difusa, aspectos também relatados por Araújo e Gomes (2020). A correlação espacial entre os pontos amostrados e a rede hidrográfica evidencia que bairros adjacentes aos córregos não canalizados, como o Riacho Reginaldo, Riacho do Silva, Riacho do Sapo e Riacho Salgadinho, apresentam níveis mais elevados de nitrato.

Esses cursos d'água atravessam áreas densamente urbanizadas e sem cobertura sanitária adequada, recebendo descargas diretas de esgoto doméstico e efluentes de fossas rudimentares. Segundo Araújo et al. (2020), a infiltração de nitrato em solos arenosos e altamente permeáveis, como os do sistema aquífero Barreiras–Marituba, favorece o transporte rápido de íons NO_3^- para o lençol freático, principalmente durante períodos chuvosos.

Além disso, Macedo et al. (2019) destacam que a ausência de impermeabilização nos leitos dos riachos urbanos e o escoamento superficial contaminado contribuem para a recarga poluída dos aquíferos rasos, fenômeno também descrito por Nascimento et al. (2021) em áreas costeiras do Nordeste. Esses processos explicam os altos teores registrados em Jacintinho e Feitosa, bairros que se encontram nas proximidades das bacias hidrográficas do Reginaldo e do Salgadinho, respectivamente, e apresentam drenagem deficiente e ocupação irregular.

Estudos recentes sobre águas subterrâneas e superficiais no Brasil mostram que a contaminação por nitrato é um problema crescente em áreas agrícolas e de baixa cobertura sanitária, exigindo monitoramento mais intenso e medidas de gestão de bacias (SANTOS, 2024).

O aquífero Barreiras-Marituba está localizado sob áreas densamente urbanizadas de Maceió, e a infiltração de efluentes domésticos sem tratamento adequado, associada à disposição inadequada de resíduos sólidos e fossas sépticas mal construídas, é apontada como a principal via de introdução de nitrato nas águas subterrâneas (SOUZA; OLIVEIRA; SILVA, 2021). Estudos realizados em áreas urbanas do Recife e Natal também relataram níveis de nitrato variando entre 10 e 40 mg/L em poços monitorados em aquíferos Barreiras (LIMA; SOARES; NASCIMENTO, 2020).

A (Tabela 2) apresenta a evolução temporal das concentrações de nitrato (NO_3^- - N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba na parte alta de Maceió (AL) entre os anos de 2022 e 2025. Observa-se que os valores variaram entre 3,36 (mg NO_3^- - N/L) e 18,67 (mg NO_3^- - N/L), demonstrando uma tendência de aumento gradual em alguns pontos de monitoramento,

especialmente nos bairros da Serraria e Santa Amélia, onde as concentrações ultrapassaram o limite de 10 (mg NO₃⁻- N/L) estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021).

Tabela 2 - Evolução temporal dos níveis de nitrato (NO₃⁻- N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba (parte alta de Maceió – AL) entre 2022 e 2025.

BAIRROS MACEIÓ PARTE ALTA	N (mg NO ₃ -N/L)	N (mg NO ₃ -N/L)	N (mg NO ₃ -N/L)	N (mg NO ₃ -N/L)
	2022	2023	2024	2025
SERRARIA				
P1 - 9°36'31.8"S - 35°42'48.6"W	13/04 9,958	13,100	05/03 15,050	28/04 18,670
P2 - 9°36'32.1"S - 35°42'45.7"W	28/04 7,061	-	16/07 10,420	20/05 12,000
SANTA AMÉLIA				
P1 - 9°35'28.5"S - 35°46'28.9"W	26/08 6,729	08/11 9,620	21/10 11,530	24/09 12,360
P2 - 9°60'30.6"S - 35°76'96.21"W	12/01 8,235	17/07 11,480	18/12 10,980	03/07 7,950
VILLAGE CAMPESTRE				
P1 - 9°33'10.73"S - 35°45'47.70"W	04/07 3,361	12/12 3,630	03/01 4,070	03/07 3,440
P2 - 9°32'50.2"S - 35°45'16.5"W	26/01 5,106	14/02 6,268	30/01 8,030	25/03 4,310
JARDIM PETROPOLIS				
P1 - 9°36'06.3"S - 35°45'30.5"W	23/03 8,606	30/08 6,630	11/03 7,090	28/08 7,040
P2 - 9°36'04.9"S - 35°45'22.0"W	06/10 8,223	19/06 6,552	08/07 6,800	-

Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

No bairro Serraria, as concentrações de nitrato variaram entre 7,06 (mg NO₃⁻- N/L) (2022) e 18,67 (mg NO₃⁻- N/L) (2025), ultrapassando de forma expressiva o limite de 10 (mg NO₃⁻- N/L) definido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021). Essa elevação acentuada sugere forte influência antrópica, possivelmente associada à infiltração de efluentes domésticos provenientes de fossas rudimentares e do esgoto não coletado.

O aumento sistemático dos níveis de nitrato nos pontos amostrados pode estar relacionado a fontes antropogênicas, como infiltração de efluentes sanitários (esgoto), uso de fertilizantes em áreas urbanas, e práticas de descarte inadequado de resíduos orgânicos. Em contextos urbanos densos, como bairros residenciais, a presença de nitrato em águas subterrâneas já é bem documentada: estudos mostram que a urbanização sem infraestrutura adequada de saneamento pode levar à lixiviação de nitrogênio orgânico e inorgânico contaminando lençóis freáticos mesmo em outras regiões do Brasil (SOUZA; OLIVEIRA; SILVA, 2021). Santos et al. (2020) também observaram concentrações superiores ao padrão em poços próximos a áreas sem cobertura de rede de esgoto, especialmente na porção central e alta da cidade, reforçando a vulnerabilidade do aquífero Barreiras nessa região.

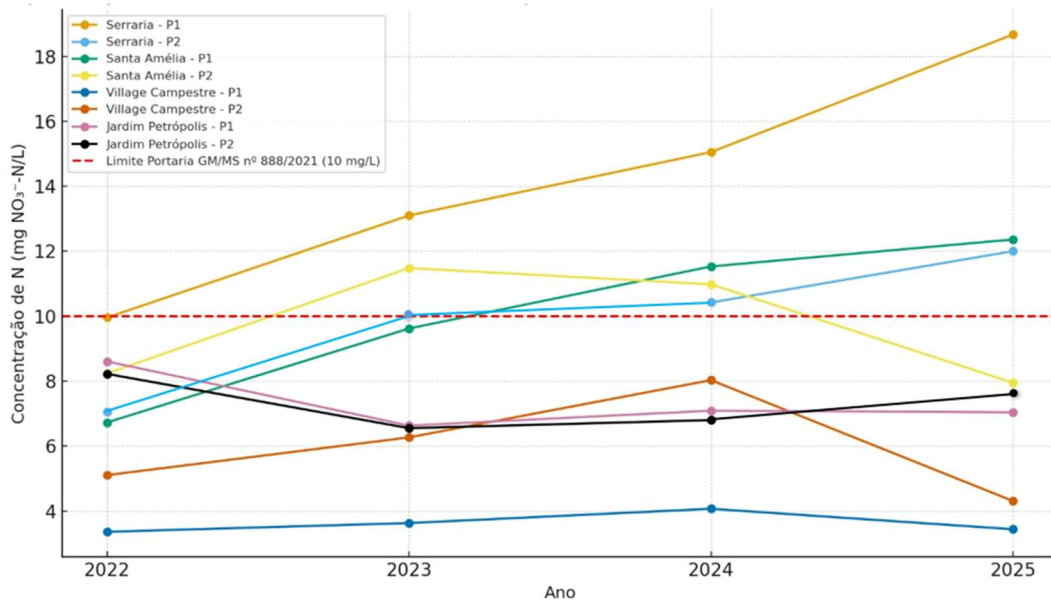
No bairro Santa Amélia, as concentrações aumentaram de 6,73 (mg NO₃⁻- N/L) (2022) para 12,36 (mg NO₃⁻- N/L) (2025), com picos entre 2023 e 2024 superiores a 11 mg/L. Esses

resultados demonstram contaminação contínua e de origem difusa, intensificada pela expansão urbana e pela proximidade com riachos urbanos não canalizados.

De acordo com Carvalho et al. (2022), aquíferos costeiros tropicais sob intensa urbanização apresentam comportamento semelhante, com acúmulo progressivo de compostos nitrogenados devido à percolação de águas residuais e à recarga de origem pluvial contaminada. Esse padrão é também descrito por Nascimento et al. (2021) em estudos realizados em áreas costeiras do Nordeste, onde a ausência de sistemas de impermeabilização dos leitos dos riachos urbanos favorece a infiltração de nitrato.

No bairro Village Campestre, os níveis de nitrato apresentaram variações mais irregulares, oscilando entre 2,26 (mg NO₃⁻- N/L) (2023) e 8,03 (mg NO₃⁻- N/L) (2024), sem ultrapassar o limite legal. Contudo, a tendência de elevação em 2024, com valores próximos de 8 (mg NO₃⁻- N/L), demonstra potencial de contaminação incipiente.

Gráfico 2 - Evolução temporal dos níveis de nitrato (NO₃⁻- N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba (parte baixa de Maceió – AL) entre 2022 e 2025



Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

O (gráfico 2), apresenta a oscilação dos níveis de nitrato no aquífero Barreiras-Marituba que corrobora com o encontrado outros estudos onde a oscilação observada pode estar relacionada a fatores sazonais como variações na precipitação e na recarga e à heterogeneidade hidrogeológica do sistema Barreiras, que apresenta condutividade variável e zonas preferenciais de fluxo que são faixas do solo e subsolo com alta permeabilidade. Pacheco et al. (2019) relatam que, em

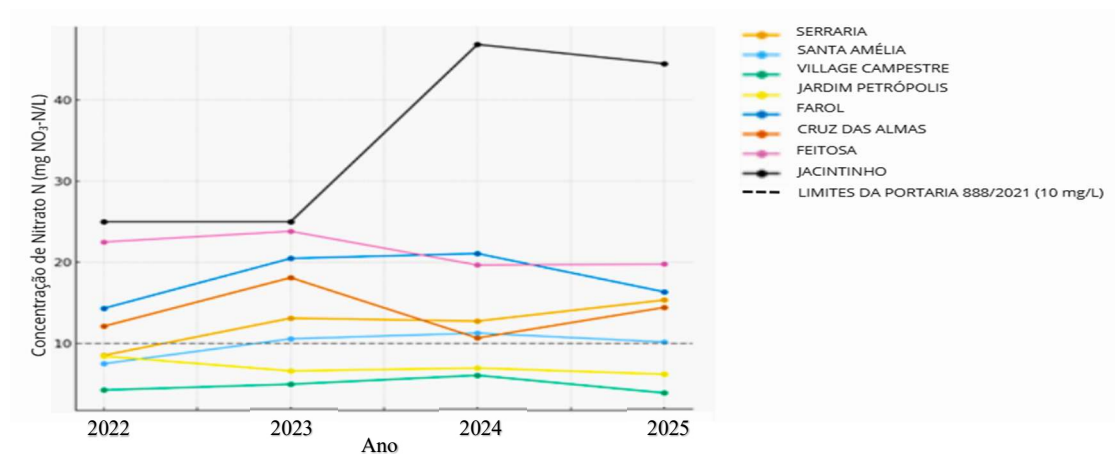
aquíferos livres de clima tropical, as concentrações de nitrato sofrem influência direta do regime pluviométrico, que controla o transporte e diluição dos compostos nitrogenados.

No bairro Jardim Petrópolis, os valores oscilaram entre 6,55 (mg NO₃⁻- N/L) (2023) e 8,60 (mg NO₃⁻- N/L) (2022), mantendo-se abaixo do limite normativo, mas sem indicar tendência de redução ao longo dos anos. Essa persistência de concentrações intermediárias sugere contaminação crônica, com recarga proveniente de áreas residenciais sem cobertura total de esgotamento sanitário.

Segundo Araújo e Gomes (2020), a baixa capacidade de autodepuração e a vulnerabilidade natural dos aquíferos costeiros do Nordeste favorecem a permanência de nitrato em níveis moderados, mesmo após períodos de recarga intensa. Esse comportamento é coerente com o observado no sistema Barreiras-Marituba, que apresenta solos arenosos e alta permeabilidade, condições que facilitam a percolação de compostos nitrogenados.

Em outros trabalhos realizados no Nordeste do Brasil, pesquisadores também observaram concentrações crescentes de nitrato em águas subterrâneas associadas à expansão urbana e à carência de redes coletoras de esgoto (PEREIRA; LIMA, 2022). Tais resultados corroboram com o padrão identificado no sistema Barreiras-Marituba, sugerindo que o fenômeno não é isolado, mas parte de uma tendência regional conforme demonstrado no (Gráfico 3)

Gráfico 3 - Evolução temporal dos níveis de nitrato (NO₃⁻- N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba (parte alta e baixa de Maceió – AL) entre 2022 e 2025



Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

Em termos regulatórios, os níveis crescentes de nitrato indicam a necessidade urgente de alinhamento com a legislação brasileira relativa à qualidade da água. A Portaria GM/MS nº 888/2021, por exemplo, define parâmetros para substâncias químicas em água destinada ao consumo humano. Se os níveis de nitrato se aproximarem ou ultrapassarem os limites permitidos, isso pode demandar ações regulatórias e de gestão por parte das autoridades locais de saneamento (BRASIL, 2021). A adoção de práticas de controle de fontes de nitrato, bem como a implementação de políticas públicas voltadas ao saneamento e ao uso responsável do solo, se tornam imprescindíveis para garantir a segurança da água para a população de Maceió.

Do ponto de vista toxicológico, ingestão crônica de nitrato está associada a riscos de metemoglobinemia em lactentes e à formação endógena de compostos N-nitrosos (potenciais carcinógenos), motivo pelo qual a vigilância desses parâmetros é considerada prioridade nas políticas de potabilidade (ONANA, 2025).

A (Tabela 3) apresenta a síntese comparativa dos resultados obtidos nas porções baixa e alta de Maceió, evidenciando diferenças significativas nos níveis de contaminação por nitrato (NO_3^- -N). Na parte baixa, observam-se valores entre 10,65 e 46,86 (mg NO_3^- -N/L), com tendência de aumento até 2024 e discreta redução em 2025, configurando níveis críticos e persistentes de contaminação. Já na parte alta, os valores variaram entre 4,20 e 26,70 (mg NO_3^- -N/L), indicando contaminação moderada, porém com tendência crescente e estabilização ao final da série temporal.

Tabela 3 - Faixa de variação, tendência temporal e situação geral dos teores de nitrato (NO_3^- -N) no sistema aquífero Barreiras-Marituba nas partes baixa e alta de Maceió (AL) entre 2022 e 2025.

Região	Faixa de valores observados (mg NO_3^- -N/L)	Tendência temporal	Situação geral
Parte baixa (Farol, Cruz das Almas, Feitosa, Jacintinho)	10,65 – 46,86	Aumento até 2024 e discreta redução em 2025	Níveis críticos e persistentes
Parte alta (Serraria, Santa Amélia, Village Campestre, Jardim Petrópolis)	4,20 – 26,70	Aumento progressivo e estabilização em 2025	Contaminação moderada, mas crescente

Fonte: SANTOS, Sidney 2025.

Essas diferenças refletem a heterogeneidade hidrogeológica e o padrão de ocupação urbana de Maceió. A parte baixa, mais densamente urbanizada e com lençol freático raso,

apresenta maior susceptibilidade à infiltração de efluentes domésticos não tratados. Por outro lado, a parte alta, embora mais elevada, sofre impacto gradual do crescimento urbano desordenado e do uso de fossas sépticas. Resultados semelhantes foram observados por Santos et al. (2020) e Carvalho et al. (2022) em estudos sobre a vulnerabilidade do aquífero Barreiras em áreas urbanas costeiras do Nordeste.

Embora não tenha sido o objetivo do estudo, o relatório do estudo hidrogeológico para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na região metropolitana de Maceió, realizado pela Agência Nacional de Águas – ANA, observaram uma presença marcante do íon nitrato nas águas subterrâneas de Maceió, de acordo com o estudo a contaminação tem origem ligada às águas residuais e efluentes domésticos infiltrados nos aquíferos por meio de fossas e vazamentos da rede de esgoto (ANA, 2011).

6 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que o sistema aquífero Barreiras-Marituba, em Maceió (AL), apresenta diferentes graus de contaminação por nitrato, com níveis críticos e persistentes na parte baixa da cidade variando de 10,65 a 46,86 (mg NO₃⁻-N/L) e contaminação moderada, porém crescente, na parte alta com valores entre 4,20 e 26,70 (mg NO₃⁻- N/L).

As concentrações observadas ultrapassam o limite de 10 (mg NO₃⁻-N/L) estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, evidenciando a influência das fontes antrópicas como o uso de fossas rudimentares e da deficiência no saneamento básico. A persistência de concentrações elevadas, mesmo após flutuações pontuais, indica baixa capacidade de autodepuração natural do aquífero, conforme descrito por Araújo e Gomes (2020).

Dessa forma, conclui-se que o nitrato (NO₃⁻- N) constitui um importante indicador de degradação da qualidade das águas subterrâneas em Maceió, representando risco significativo à saúde pública, especialmente pelo potencial de causar metemoglobinemia em crianças e câncer gástrico em adultos expostos de forma crônica.

Recomenda-se a implementação de ações permanentes de educação ambiental voltadas à conscientização da população sobre a proteção das águas subterrâneas e o uso adequado de sistemas de esgotamento sanitário, como estratégia de mitigação da contaminação. Tais ações contribuem diretamente para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ao reduzir riscos à saúde pública, o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao promover a melhoria da qualidade da água, e o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao incentivar práticas de gestão urbana ambientalmente responsáveis.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água**. Brasília: ANA, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Estudos hidrogeológicos para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió**. v. 1: Aspectos gerais da área do projeto. Brasília: ANA; SIP, 2011.
- ARAÚJO, F. S.; GOMES, M. A. Vulnerabilidade e autodepuração de aquíferos costeiros: implicações ambientais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 50, n. 2, p. 205–218, 2020.
- ARAÚJO, M. C.; GOMES, R. L. Vulnerabilidade e processos de autodepuração em aquíferos costeiros tropicais: implicações para a qualidade da água subterrânea. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, p. 145–160, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.3057>.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- BARNES, R. J.; CLEMENS, J. Nitrite dynamics and transformation pathways in aquatic nitrogen cycling. **Environmental Reviews**, v. 29, n. 4, p. 456–472, 2021. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0093>.
- Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021. p. 127–128. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 08 out. 2025.
- BREUER, L. et al. Assessing the impact of land use change on nitrogen fluxes in a tropical catchment. **Journal of Hydrology**, v. 351, n. 1–2, p. 1–17, 2008.
- BRITO, M. E.; SANTOS, C. R.; MENDES, A. R. Avaliação do ciclo do nitrogênio e sua influência na qualidade da água em reservatórios tropicais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, n. 4, p. 1–14, 2022. <https://doi.org/10.1590/rbrh.v27n4.2022>.
- CARVALHO, R. P. et al. Contaminação por nitrato em aquíferos costeiros tropicais: influência da urbanização e do saneamento. **Águas Subterrâneas**, v. 36, n. 2, p. 77–91, 2022.
- CARVALHO, T. S.; LIMA, M. A.; SOUZA, J. P.; SILVA, E. F. Avaliação da contaminação por nitrato em aquíferos costeiros sob influência urbana em regiões tropicais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, e9, p. 1–15, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.2720220009>.
- COSTA, E. D. J. **Utilização de resinas de troca iônica para remoção de nitrato em águas para abastecimento público**. 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/54833>. Acesso em: 05 out. 2025.
- ELIS, V. R.; BARROSO, C. M. R.; KIANG, C. H. Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do sistema aquífero Barreiras/Marituba em Maceió – AL. **Revista Brasileira**

de **Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 101–113, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2004000200001>.

FAZZIO, A. L. et al. Influência do escoamento subterrâneo e atividades antrópicas nas concentrações de nitrato na Região Metropolitana de Maceió-AL. **Águas Subterrâneas**, 2011. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28153>. Acesso em: 05 jan. 2026.

FOSTER, S.; CHILTON, J. **Groundwater**: the processes and global significance of aquifer degradation. Stockholm: Global Water Partnership, 2018. (TEC Background Papers, n. 23).

GIL MARQUES, C. H.; TERADA, R.; GALVÃO, P. H.; HIRATA, R. Evolução espacial e temporal da contaminação por nitrato no aquífero urbano de Urânia (SP). *Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 258–269, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29524>. Acesso em: 10 nov. 2025.

GOMES, M. G. et al. Evolução temporal e espacial do nitrato em aquífero urbano – estudo de caso. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 5, 2017. Disponível em: <https://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/view/29030>. Acesso em: 05 jan. 2026.

HAMIDI, S. et al. Nitrate contamination of groundwater and associated human health risks: a global review. **Environmental Research**, v. 216, 114574, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2022: Maceió (AL)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio/panorama>. Acesso em: 05 jan. 2026.

KATZ, B. G.; EBERTS, S. M.; KAUFFMAN, L. J. Using Cl/Br ratios and other indicators to assess impacts on groundwater quality from septic systems. **Journal of Hydrology**, v. 397, n. 3–4, p. 151–166, 2011.

KHERA, R.; RANSOM, P.; GUTTRIDGE, M.; SPETH, T. F. Estimating costs for nitrate and perchlorate treatment for small drinking water systems. **AWWA Water Science**, Hoboken, v. 3, n. 2, e1224, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aws2.1224>. Acesso em: 13 out. 2025.

LIMA, J. S. et al. Avaliação da contaminação por nitrato em aquíferos Barreiras de ambientes urbanos do Nordeste do Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 3, p. 215–230, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i3.3120>.

LIMA, M. C.; OLIVEIRA, A. P.; SANTOS, J. R. Contaminação por nitrato em aquíferos costeiros do Nordeste brasileiro. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 3, p. 245–258, 2018.

MACEDO, J. P. S.; SILVA, R. T.; MOURA, L. C. Impactos do escoamento superficial urbano na qualidade das águas subterrâneas em bacias hidrográficas costeiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, e16, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1590/2318-0331.241920190016.

MORITA, A. K. M. et al. Pollution threat to water and soil quality by dumpsites and non-sanitary landfills in Brazil. **Waste Management**, v. 131, p. 163–176, 2021.

NASCIMENTO, V. F.; LOPES, A. P.; SANTOS, E. L. Contaminação difusa e recarga poluída de aquíferos costeiros no Nordeste brasileiro: estudo de caso em ambiente urbano. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 1, p. 45–59, 2021. DOI: 10.14295/ras.v35i1.3120.

NASCIMENTO, V. F.; LOPES, A. P.; SANTOS, E. L. Contaminação difusa e recarga poluída de aquíferos costeiros no Nordeste brasileiro: estudo de caso em ambiente urbano. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 1, p. 45–59, 2021. DOI: 10.14295/ras.v35i1.3120.

ONANA, A. B. A.; NGASSAM, S. Y.; MFONKA, Z.; NGA ONANA, A. A.; NDAM NGOUPAYOU, J. **Water quality and human health risk assessment of nitrate in drinking water in the SAO watershed (West, Cameroon)**. *Discover Geoscience*, v. 3, art. 114, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44288-025-00206-6>. Acesso em: 13 out. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 05 jan. 2026.

PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; VALE, M. J.; SANTOS, R. M. Nitrate contamination in groundwater: causes, patterns, and trends in aquifers of Portugal. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 10, p. 10312–10330, 2019. DOI: 10.1007/s11356-019-04656-4.

PACHECO, F. A. L.; MENDES, M. P.; MARTINS, I. J. Dynamics of nitrate pollution in alluvial aquifers: influence of climate and land use. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 101–116, 2019.

PICETTI, R. et al. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: a systematic review with meta-analysis. **Environmental Research**, v. 210, 112988, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112988>.

ROCHA, J. S. **Caracterização hidrogeológica e vulnerabilidade do sistema aquífero Barreiras–Marituba na Região Metropolitana de Maceió**. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

SÃO PAULO (Estado). Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Câmara Técnica de Águas Subterrâneas. **Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual**. São Paulo: SIMA/IPA, 2021.

SANTOS, E. R. P. et al. Vulnerabilidade natural e antrópica do aquífero Barreiras em áreas urbanas de Maceió-AL. **Revista Geonorte**, v. 11, n. 41, p. 114–130, 2020.

SANTOS, R. C.; AGUILAR DA SILVA, R.; BOVO, A. B.; MOREIRA DOS SANTOS, M.; FURTADO DA SILVA, A. **Assessing nitrate contamination in groundwater for public health: a study in a small Brazilian town**. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 25, 101084, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101084>. Acesso em: 13 out. 2025.

SCHROEDER, J. E. et al. Nitrate and nitrite exposure and health effects: evidence and uncertainties. **Environmental Health Perspectives**, v. 128, n. 9, p. 096001, 2020. DOI: 10.1289/EHP6209.

SEYYEDSALEHI, M. S.; MOHEBBI, E.; TOURANG, F.; SASANFAR, B.; BOFFETTA, P.; SINGH, U. K. et al. Assessment of the impact of landfill on groundwater quality: a case study of the Pirana site in western India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 141, n. 1–3, p. 309–321, 2008.

SOUSA, L. M.; FERNANDES, A. C.; LIMA, J. F. Processos biogeoquímicos do nitrogênio e implicações ambientais. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 15, n. 2, p. 65–78, 2021.

SOUZA, F. A.; OLIVEIRA, M. P.; SILVA, T. J. Fontes e dinâmicas do nitrato em aquíferos urbanos: estudo de caso no Brasil. **Ciência & Água**, v. 12, n. 3, p. 210–223, 2021.

SOUZA, R. M. G. L. Portaria GM/MS nº 888/2021 e sua relação com a Norma ABNT NBR 17080/2023: um avanço na segurança da água. São Paulo: **ABES-SP**, 2023. Disponível em: <https://www.abes-sp.org.br/portaria-gm-ms-no-888-2021-e-sua-relacao-com-a-norma-abnt-nbr-17080-2023-um-avanco-na-seguranca-da-agua/>. Acesso em: 13 out. 2025.
Geneva: WHO, 2017. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acesso em: 13 out. 2025.

TSAI, S. W.; WU, M. C.; NG, H. Y.; HOU, C.-H. Advancing the electrosorption selectivity of nitrate through fine-tuning hydrophobic ammonium functional groups in anion exchange membranes for membrane capacitive deionization. **ACS ES&T Water**, Washington, v. 4, n. 12, p. 5598–5607, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00619>. Acesso em: 30 set. 2025.

UNESCO. **Water for a sustainable world**. Paris: UNESCO, 2015. (World Water Development Report). Disponível em: <https://www.unesco.org>. Acesso em: 05 jan. 2026.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

WANG, S. et al. Hydrochemical evolution characteristics, controlling factors, and high nitrate hazards of shallow groundwater in a typical agricultural area of Nansi Lake Basin, North China. **Environmental Research**, p. 115430, 2023.

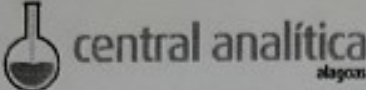
WARD, M. H. et al. Drinking water nitrate and human health: an updated review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 7, 1557, 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking-water quality. 4. ed. Geneva: World Health Organization, 2017. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acesso em: 05 jan. 2026.

WRAGE-MÖNNIG, N. et al. Soil processes controlling nitrite dynamics in agricultural systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 123, p. 97–109, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.05.021.

ZHANG, Y. et al. Microbial nitrogen transformations in aquatic environments: implications for nutrient management. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 9, p. 5732–5744, 2020. DOI: 10.1021/es904112f.

ANEXO



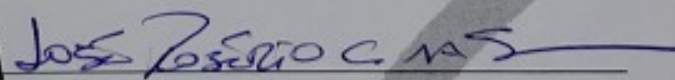
TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA USO DE DADOS EM PESQUISA ACADÊMICA

Pelo presente instrumento, o Laboratório **CENTRO ANALÍTICO LTDA**, pessoa de direito privado, inscrita no **CNPJ 28.942.524/0001-10**, com sede na Rua Sá e Albuquerque Jaraguá, Maceió - Alagoas, com CEP 57022-180, **AUTORIZA** o uso de dados exclusivamente acadêmicos, mediante autorização institucional, em estrita observância aos princípios de confidencialidade, sigilo, proteção das informações dos clientes.

Os dados serão utilizados unicamente para a elaboração de artigo acadêmico/científico, vedada qualquer utilização com fins comerciais. As informações serão tratadas de forma anonimizada e agregada.

Maceió – AL, 07 de Janeiro de 2026

Responsável Legal


José Robério Cavalcante da Silva

Pesquisador

CNPJ 28.942.524/0001-10
CENTRO ANALÍTICO LTDA- EPP
Rua Sá e Albuquerque, 184
JARAGUÁ - CEP 57.022-180
Maceió-AL