

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM ESCOLAS DO SEMIÁRIDO PARAIBANO: INTEGRAÇÃO DE DADOS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS PARA PREDIÇÃO DE CONTAMINAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM DOENÇAS VINCULADAS AO HÍDRICO

WATER QUALITY MONITORING IN SCHOOLS OF THE SEMI-ARID REGION OF PARAÍBA, BRAZIL: INTEGRATION OF PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL DATA FOR CONTAMINATION PREDICTION AND ITS RELATIONSHIP WITH WATERBORNE DISEASES

MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN ESCUELAS DEL SEMIÁRIDO DE PARAÍBA, BRASIL: INTEGRACIÓN DE DATOS FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN Y SU RELACIÓN CON ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR EL AGUA

Josean da Silva¹, Cleonilson Protasio de Souza², Ane Polline Lacerda Protasio³, Rita de Cássia Lucena de Santana Silva⁴

DOI: 10.54899/dcs.v23i86.4181

Recibido: 08/01/2026 | Aceptado: 12/01/2026 | Publicación en línea: 21/01/2026.

RESUMO

Este estudo avaliou a qualidade da água em escolas públicas do semiárido paraibano, integrando dados físico-químicos, microbiológicos e epidemiológicos para predizer o risco de contaminação. Trata-se de estudo quantitativo e observacional realizado em quatro escolas de Itabaiana/PB, com monitoramento contínuo por sensores IoT durante 176 dias. Foram analisados pH, temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), condutividade, salinidade, cor e turbidez. Microrganismos indicadores foram detectados por PCR Multiplex e qPCR. A regressão logística revelou associações significativas, especialmente entre STD, salinidade e contaminação microbiana. Dados do e-SUS APS indicaram doenças relacionadas à água. Conclui-se que parâmetros físico-químicos atuam como proxies de risco microbiano em ambientes escolares.

Palavras-chave: Qualidade da Água. Monitoramento Remoto. Regressão Logística. Saúde Escolar. Doenças Hídricas.

¹ Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil. E-mail: josean@ctagua.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-8774-0037>

² Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil. E-mail: protasio@cear.ufpb.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8182-3516>

³ Doutora em Modelos de Decisão e Saúde, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil. E-mail: anepolline@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2895-436X>

⁴ Especialista em Gestão da Qualidade e Auditoria, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil. E-mail: Cassia@ctagua.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-6655-3140>

ABSTRACT

This study evaluated water quality in public schools in the semi-arid region of Paraíba, Brazil, integrating physicochemical, microbiological, and epidemiological data to predict contamination risk. A quantitative observational study was conducted in four schools in Itabaiana using IoT-based monitoring over 176 days. Parameters included pH, temperature, total dissolved solids (TDS), conductivity, salinity, color, and turbidity. Indicator microorganisms were detected by Multiplex PCR and qPCR. Logistic regression revealed significant associations, particularly between TDS, salinity, and microbiological contamination. Secondary data from the Brazilian primary health system (e-SUS APS) indicated water-related diseases. The results support the use of physicochemical parameters as proxies for microbiological risk in school water surveillance.

Keywords: Water Quality. Remote Monitoring. Logistic Regression. School Health. Waterborne Diseases.

RESUMEN

Este estudio evaluó la calidad del agua en escuelas públicas del semiárido de Paraíba, Brasil, integrando datos físico-químicos, microbiológicos y epidemiológicos para predecir el riesgo de contaminación. Se realizó un estudio cuantitativo y observacional en cuatro escuelas de Itabaiana, con monitoreo continuo mediante sensores IoT durante 176 días. Se analizaron pH, temperatura, sólidos totales disueltos (STD), conductividad, salinidad, color y turbidez. Los microorganismos indicadores se detectaron mediante PCR Multiplex y qPCR. La regresión logística mostró asociaciones significativas, especialmente entre STD, salinidad y contaminación microbiológica. Datos del sistema e-SUS APS evidenciaron enfermedades relacionadas con el agua. Se concluye que los parámetros físico-químicos son proxies útiles del riesgo microbiológico en entornos escolares.

Palabras clave: Calidad del Agua. Monitoreo remoto. Regresión Logística. Salud Escolar. Enfermedades Hídricas.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

No Nordeste brasileiro, e particularmente no semiárido paraibano, escolas públicas frequentemente dependem de sistemas alternativos de abastecimento, como poços, cisternas e carros-pipa, os quais estão sujeitos à ausência de monitoramento contínuo e à mitigação da qualidade da água (SILVA e SOUZA, 2025). Este cenário favorece a ocorrência de doenças de veiculação hídrica entre crianças, um grupo particularmente vulnerável devido à exposição frequente e à limitada infraestrutura de saneamento na região (ANDRE, et al, 2023).

Tradicionalmente, o controle da qualidade da água é realizado de forma pontual, com base em coletas manuais e análises laboratoriais que não refletem as variações temporais das condições físico-químicas do recurso hídrico. Neste cenário, a adoção de tecnologias emergentes, como sensores inteligentes e plataformas de monitoramento remoto baseadas em Internet das Coisas (IoT), surge como uma alternativa inovadora e sustentável (DA SILVA e SOUZA, 2025). Tais sistemas possibilitam a aquisição contínua de dados físico-químicos — incluindo pH, condutividade elétrica, temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), salinidade, cor e turbidez — possibilitando o acompanhamento em tempo real e a construção de modelos preditivos capazes de antecipar cenários de risco microbiológico.

A integração de dados físico-químicos e microbiológicos por meio de modelagem estatística representa um avanço significativo na gestão da segurança hídrica. A aplicação da regressão logística, ajustada pelos métodos stepwise (forward e backward Wald), permite identificar os fatores mais associados à presença de microrganismos indicadores de contaminação, como *Clostridium perfringens*, coliformes totais, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, enterococos e clostrídios sulfito redutores (BARCELLOS, 2021).

Nesta perspectiva, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de uma plataforma inteligente de monitoramento remoto para a predição da contaminação microbiológica da água utilizada em escolas públicas localizadas no semiárido paraibano. Por meio da integração de sensores IoT e análise estatística multivariada, busca-se demonstrar a viabilidade de modelos preditivos como instrumentos de apoio à tomada de decisão em políticas de vigilância ambiental e saúde escolar. A proposta alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e ao ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), reforçando o papel da inovação tecnológica como ferramenta de equidade e sustentabilidade no acesso à água de qualidade.

REFERENCIAL TEÓRICO

Legislação Brasileira sobre a Qualidade da Água Destinada ao Consumo Humano em Escolas Públicas

A garantia da qualidade da água destinada ao consumo humano constitui um dos pilares fundamentais da saúde pública, estando diretamente relacionada à prevenção de doenças de

veiculação hídrica e à promoção de condições adequadas de vida, especialmente em ambientes escolares (ANDRE, et al, 2023). No Brasil, o arcabouço normativo que rege essa temática resulta da articulação entre legislações dos setores de saúde, educação, saneamento básico e recursos hídricos. A competência para regulamentar os padrões de potabilidade da água no país foi atribuída ao Ministério da Saúde pelo Decreto nº 79.367, de 9 de março de 1977, que estabeleceu as bases para a definição de critérios técnicos e sanitários aplicáveis à água destinada ao consumo humano. A partir desse marco, sucessivas normativas foram editadas com o objetivo de estabelecer limites microbiológicos, físicos e químicos capazes de assegurar a proteção da saúde da população (BRASIL, 1977).

Nesse contexto, destaca-se a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, atualmente vigente, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Essa normativa estabelece parâmetros obrigatórios de monitoramento, define responsabilidades dos prestadores de serviços de abastecimento e orienta as ações de vigilância sanitária desenvolvidas pelos entes federativos, incluindo ambientes sensíveis, como escolas, creches e unidades de saúde (BRASIL, 2021).

As ações de vigilância são operacionalizadas por meio do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua), vinculado ao Sistema Único de Saúde (SUS). O programa tem como finalidade avaliar continuamente os riscos associados à água consumida pela população, promover intervenções preventivas e reduzir a ocorrência de agravos à saúde relacionados à exposição a água de qualidade inadequada (BRASIL, 2023). Em ambientes escolares, essas ações assumem caráter estratégico, uma vez que crianças e adolescentes constituem grupos mais vulneráveis aos efeitos da contaminação hídrica. No campo da gestão dos recursos hídricos, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, estabelece princípios voltados à garantia do uso múltiplo e sustentável da água, reconhecendo-a como um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. Embora essa lei não trate diretamente da potabilidade, ela fornece as bases para a proteção dos mananciais utilizados no abastecimento público, impactando diretamente a qualidade da água distribuída às instituições de ensino (BRASIL, 1997).

Avanço normativo relevante ocorreu com a promulgação da Lei nº 15.276, de 28 de novembro de 2025, que passou a estabelecer de forma explícita a obrigatoriedade de garantir água potável e infraestrutura física e sanitária adequadas em todas as instituições de ensino públicas

do Brasil. Essa lei alterou dispositivos da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Lei nº 9.394/1996) e da Lei nº 11.947/2009, que trata do Programa Nacional de Alimentação Escolar, incorporando o acesso à água potável como um direito fundamental dos estudantes e condição indispensável para sua permanência e aprendizagem (BRASIL, 2025).

A nova legislação atribui responsabilidades compartilhadas à União, aos Estados, aos Municípios e ao Distrito Federal quanto à implementação, manutenção e fiscalização das condições de abastecimento de água e saneamento básico nas escolas públicas. Tal diretriz reforça a indissociabilidade entre educação, saúde e saneamento, alinhando-se às recomendações de organismos internacionais, como a Organização Mundial da Saúde e o Fundo das Nações Unidas para a Infância, que reconhecem o acesso à água segura em escolas como elemento essencial para a promoção da saúde, da dignidade e do desenvolvimento infantil (WHO, 2017; UNICEF, 2019). Dessa forma, o ordenamento jurídico brasileiro consolida um arcabouço normativo robusto que não apenas define padrões técnicos de qualidade da água para consumo humano, mas também assegura sua oferta obrigatória em ambientes escolares, configurando-se como um instrumento essencial para a proteção da saúde pública e para a efetivação do direito à educação em condições adequadas.

Cenário Brasileiro da Gestão de Recursos Hídricos

A demanda por sistemas de monitoramento de água no Brasil tem crescido de forma significativa, motivada por fatores estruturais e econômicos que pressionam tanto a oferta quanto a gestão dos recursos hídricos (BARBOSA, 2023; CAMARGO, 2023). A verdade é que o país enfrenta uma pressão crescente na disponibilidade de água tratada, impulsionada pelo aumento populacional e pela expansão industrial. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021) projeta que a demanda por água pode crescer até 24% até 2030, o que exige investimentos em tecnologias que ajudem a garantir a qualidade dos recursos hídricos.

Esse aumento de demanda ocorre em um contexto no qual ainda há desigualdades importantes no acesso ao abastecimento formal de água no Brasil, dado que estimativas de órgãos de pesquisa (ANA, 2019; BRASIL, 2020) apontam que cerca de 34 milhões de brasileiros ainda não têm acesso a sistemas formais de água, e mais de 90 milhões não contam com coleta e tratamento de esgoto adequados, evidenciando um déficit relevante na infraestrutura de saneamento básico no país.

Um estudo do Instituto Trata Brasil (2025) mostra que, considerando um crescimento econômico estável com o PIB crescendo em cerca de 2,7% ao ano, a demanda por água tratada pode requerer um aumento de cerca de 59,3% até 2050 em relação aos níveis atuais. Essa estimativa leva em conta fatores demográficos, econômicos e mudanças no consumo, reforçando a necessidade de tecnologias avançadas de tratamento e maior eficiência no uso da água. Assim, o contexto de escassez e risco hídrico no país reforça a urgência por soluções eficientes de monitoramento e tratamento.

Estudos recentes (ANA, 2019; ANA, 2023) apontam que, se nada for feito para melhorar a eficiência e a gestão hídrica, o Brasil pode enfrentar restrições no abastecimento, com períodos de racionamento estimados em até 12 dias por ano em média até 2050, especialmente em regiões mais secas como o Nordeste.

É dentro deste contexto que se deve considerar que a qualidade da água destinada ao consumo humano é um fator determinante para a promoção da saúde pública, especialmente em regiões semiáridas (WHO, 2017; UNICEF, 2019), onde as condições ambientais e a limitação de recursos hídricos potencializam os riscos de contaminação microbiológica, já que a utilização de fontes alternativas de abastecimento, aliada à limitação de monitoramento contínuo na região, amplia o risco sanitário associado à água consumida (ANA, 2021).

Qualidade da Água e Indicadores de Contaminação

A potabilidade da água é um parâmetro indispensável à saúde pública e à sustentabilidade ambiental. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, a qualidade da água destinada ao consumo humano deve atender a limites físico-químicos e microbiológicos específicos que assegurem tanto a ausência de organismos patogênicos quanto a inexistência de substâncias nocivas (BRASIL, 2021). Entre os indicadores microbiológicos mais utilizados estão os coliformes totais, *Escherichia coli*, enterococos, *Clostridium perfringens* e *Pseudomonas aeruginosa*, os quais representam potenciais contaminantes de origem fecal e indicadores de falhas nos processos de desinfecção ou infiltração de esgoto (SOARES, et al, 2025).

Estudos epidemiológicos demonstram forte correlação entre a presença desses microrganismos e o aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica, especialmente em populações infantis (BRASIL, 2025; SILVA, et al, 2022; SOARES, et al, 2025; COLET, et al, 2021; CONCEIÇÃO et al, 2020). No semiárido brasileiro, onde as fontes de abastecimento são

frequentemente intermitentes e de qualidade variável, a contaminação microbiológica da água representa uma das principais causas de infecções gastrointestinais e parasitárias em crianças em idade escolar (AHMED, et al, 2020) e assim, o monitoramento contínuo e a previsão da contaminação tornam-se estratégias fundamentais para a prevenção e mitigação de riscos à saúde (MOREIRA, et.al, 2025).

Os parâmetros físico-químicos exercem influência direta sobre o comportamento e a sobrevivência de microrganismos em ambientes aquáticos. O pH, por exemplo, afeta a estabilidade das membranas celulares bacterianas, enquanto a temperatura regula a taxa de crescimento microbiano (BARCELLOS, 2021). A condutividade elétrica e os sólidos totais dissolvidos (STD) estão relacionados à concentração iônica do meio, podendo favorecer ou limitar a proliferação de espécies patogênicas. Da mesma forma, a salinidade e a cor aparente refletem alterações na composição mineral e na presença de matéria orgânica, atuando como variáveis associadas à qualidade e ao grau de tratamento da água (BORGES, et. al, 2023). Diversas pesquisas (ARAÚJO, et al, 2020; BÁRTA, et al., 2021; DE SOUZA, et al, 2022; BARCELLOS, 2021; LABED, et al., 2019) apontam que a combinação desses parâmetros pode ser utilizada como base para modelos estatísticos ou computacionais de predição microbiológica.

Água Contaminada e Doenças de Veiculação

A água destinada ao consumo humano, quando contaminada por agentes biológicos, constitui um dos principais vetores de transmissão de doenças infecciosas, especialmente em regiões com deficiência de saneamento básico. Microrganismos patogênicos — incluindo protozoários, helmintos, bactérias e vírus — podem atingir os sistemas hídricos por meio de esgotos domésticos, dejetos animais e resíduos urbanos, representando um risco significativo à saúde pública (WHO, 2017; APHA, 2018).

As doenças de veiculação hídrica estão, tanto na Classificação Internacional de Doenças (CID) quanto na Classificação Internacional de Atenção Primária (CIAP-2), entre as principais causas de morbidade e mortalidade em países em desenvolvimento, sendo frequentemente associadas ao consumo de água não tratada ou inadequadamente tratada (HUNTER et al., 2010).

A amebíase, por exemplo, é uma infecção intestinal causada pelo protozoário *Entamoeba histolytica*, cuja transmissão ocorre predominantemente pela ingestão de cistos presentes em água ou alimentos contaminados por fezes humanas. Em ambientes aquáticos, os cistos apresentam

elevada resistência a condições adversas, podendo sobreviver por longos períodos (FOTEDAR; STARK, 2012). A infecção pode ser assintomática ou evoluir para quadros clínicos graves, como disenteria amebiana e abscessos hepáticos, sendo considerada um importante problema de saúde pública em áreas com saneamento precário (WHO, 2020).

Outro exemplo são as doenças diarreicas, que constituem um grupo de enfermidades frequentemente associadas à ingestão de água contaminada por bactérias (*Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*), vírus (rotavírus, norovírus) e protozoários (*Giardia lamblia*, *Cryptosporidium* spp.). A diarreia de origem hídrica é responsável por elevada carga de doenças, especialmente em crianças menores de cinco anos (UNICEF; WHO, 2019).

Sob o ponto de vista da biologia, para se realizar estudos sobre a potabilidade microbiológica, utiliza-se de bioindicadores para se classificar o grau de pureza da água. O exemplo mais comum é a determinação de coliforme termotolerantes; sendo amplamente utilizada como indicação de contaminação microbiológica e risco potencial de ocorrência de surtos diarreicos (APHA, 2018).

A ascaridíase, por sua vez, é uma helmintíase causada pelo nematoide *Ascaris lumbricoides*, popularmente conhecido como lombriga. A transmissão ocorre pela ingestão de ovos embrionados presentes no solo, em alimentos ou na água contaminada por fezes humanas (CDC, 2022).

Os ovos de *A. lumbricoides* apresentam elevada resistência ambiental, podendo permanecer viáveis por meses em ambientes aquáticos. A infecção está associada a manifestações clínicas como desnutrição, obstrução intestinal e comprometimento do desenvolvimento infantil (BETHONY et al., 2006). Embora a dengue não seja transmitida diretamente pela ingestão de água contaminada, sua relação com ambientes aquáticos é indireta, porém relevante. A doença é causada por um arbovírus do gênero *Flavivirus*, transmitido pelo mosquito *Aedes aegypti*, que utiliza recipientes com água parada — frequentemente água armazenada de forma inadequada — como criadouros (WHO, 2012).

Em áreas com abastecimento irregular de água, o armazenamento doméstico favorece a proliferação do vetor, aumentando o risco de transmissão da dengue. Assim, a gestão inadequada da água constitui um fator ambiental determinante na dinâmica epidemiológica da doença (BRASIL, 2019).

A ocorrência simultânea de doenças de veiculação hídrica e vetorial evidencia a necessidade de políticas integradas de saneamento, monitoramento da qualidade da água e

educação em saúde. E, nesta direção, a análise microbiológica e físico-química da água, aliada à vigilância epidemiológica, é fundamental para a prevenção desses agravos e para a promoção da saúde coletiva (WHO, 2017).

Tecnologias Emergentes e Monitoramento Remoto da Qualidade da Água

O uso de plataformas inteligentes de monitoramento remoto integra-se a uma perspectiva de inovação tecnológica voltada à sustentabilidade hídrica. Em regiões semiáridas, onde o acesso à água potável é limitado e a gestão de recursos depende fortemente da variabilidade climática, a adoção de tecnologias de baixo custo e alto impacto social é fundamental. A proposta de integração entre sensores IoT, modelagem estatística e análise de risco microbiológico representa uma abordagem sistêmica, capaz de aprimorar o controle da qualidade da água e fortalecer as estratégias de vigilância ambiental. Além disso, contribui diretamente para o cumprimento de metas globais de desenvolvimento sustentável, ao promover a universalização do acesso à água segura (ODS 6) e à saúde de qualidade (ODS 3), especialmente entre populações infantis.

O fato é que o avanço das tecnologias da informação e comunicação (TICs) tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas inteligentes voltados à gestão de recursos hídricos (CORREIA, et al, 2025). A Internet das Coisas (IoT) destaca-se nesse cenário ao possibilitar a integração de sensores, redes de comunicação e plataformas em nuvem, permitindo a coleta, o processamento e a transmissão contínua de dados ambientais em tempo real. Assim, em sistemas de abastecimento de água, sensores IoT medem parâmetros físico-químicos, cujos valores são transmitidos para plataformas de monitoramento remoto. Essas plataformas realizam processamento, armazenamento e análise dos dados, podendo acionar alertas automáticos quando os valores ultrapassam limites pré-definidos (ALOTAIBI, 2024), de maneira que, além de reduzir custos e tempo de resposta, a sensores IoT permite a construção de modelos preditivos baseados em modelos estatísticos e inteligentes, capazes de antecipar eventos de contaminação e subsidiar a tomada de decisão em políticas públicas (ANDRE, 2023).

No contexto escolar, a adoção de tecnologias de monitoramento remoto de água representa uma inovação de caráter social e ambiental, pois, além de promover o controle da qualidade da água consumida pelas crianças, pode contribuir para a formação de uma cultura de gestão ambiental participativa, aproximando a ciência e a tecnologia da comunidade escolar e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Modelagem Preditiva e Regressão Logística Aplicada à Qualidade da Água

A modelagem preditiva tem se consolidado como uma ferramenta essencial no monitoramento e na gestão da qualidade da água, especialmente em contextos que demandam análises rápidas, interpretação de grandes volumes de dados e apoio à tomada de decisão ambiental (BERGMANN, 2019). O avanço das técnicas estatísticas e computacionais possibilitou o desenvolvimento de modelos capazes de relacionar variáveis físico-químicas e microbiológicas a estados discretos de qualidade da água, como conformidade ou não conformidade, com padrões sanitários e ambientais.

Nesse cenário, a regressão logística destaca-se como uma técnica estatística amplamente empregada para modelar relações entre um conjunto de variáveis explicativas e, por exemplo, uma variável dependente dicotômica, representada por dois estados possíveis, usualmente codificados como presença (1) ou ausência (0) de um evento (HOSMER; LEMESHOW; STURDIVANT, 2013). O modelo logístico baseia-se na função logística, que transforma uma combinação linear das variáveis independentes em probabilidades estimadas, permitindo avaliar a chance de ocorrência do evento de interesse (SILVA et al., 2024).

Uma das principais vantagens da regressão logística em estudos ambientais é sua flexibilidade, uma vez que não exige normalidade da variável resposta e possibilita a inclusão simultânea de múltiplos parâmetros ambientais. Além disso, os coeficientes estimados podem ser interpretados por meio das razões de chances (odds ratios), o que facilita a compreensão do impacto individual de cada variável explicativa sobre a probabilidade do evento analisado, tornando o método especialmente adequado para aplicações em saúde, monitoramento ambiental e vigilância da qualidade da água (HOSMER; LEMESHOW; STURDIVANT, 2013).

Estudos recentes demonstram que a regressão logística tem sido amplamente aplicada à avaliação da qualidade da água, especialmente para prever potabilidade e presença de contaminantes microbiológicos a partir de parâmetros físico-químicos como aqueles citados neste trabalho. As pesquisas indicam que esse tipo de modelagem contribui para identificar fatores críticos associados à degradação da qualidade hídrica, auxiliando no direcionamento de ações de monitoramento e controle (SINGH et al., 2023; YAROSHENKO et al., 2020).

Além disso, a regressão logística tem sido utilizada em conjunto com técnicas de aprendizado supervisionado, sendo frequentemente comparada a algoritmos de machine learning, como Random Forest, Support Vector Machines e redes neurais artificiais. Embora alguns

algoritmos apresentem maior desempenho preditivo em determinados cenários, a regressão logística mantém relevância devido à sua robustez, simplicidade computacional e elevada interpretabilidade, características essenciais para aplicações em estudos ambientais e em contextos regulatórios (AHMED et al., 2022).

A literatura recente também aponta avanços metodológicos relacionados à otimização dos modelos logísticos, com o uso de métodos automáticos de seleção de variáveis e algoritmos de otimização para melhorar a acurácia e a generalização dos modelos preditivos. Essas abordagens híbridas reforçam o papel da regressão logística como uma técnica consolidada e adaptável, capaz de atender às demandas atuais de análise preditiva da qualidade da água em diferentes escalas espaciais e temporais (ZHANG et al., 2023).

Dessa forma, a regressão logística se apresenta como uma ferramenta estatística importante na modelagem preditiva aplicada à qualidade da água, contribuindo não apenas para a classificação de estados dicotômicos de qualidade, mas também para a compreensão dos fatores ambientais associados à ocorrência de contaminação, subsidiando estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos.

MATERIAL E MÉTODO

O estudo foi realizado em quatro escolas municipais da cidade de Itabaiana, localizada na região do semiárido paraibano, cuja caracterização climática é marcada por altas temperaturas, baixa pluviosidade e forte dependência de fontes intermitentes de abastecimento de água; características consideradas eletivas para escolha amostral.

Desta maneira, trata-se de um estudo quantitativo, analítico e observacional, desenvolvido a partir da análise de dados físico-químicos e microbiológicos de amostras de água. O objetivo foi avaliar a associação entre variáveis ambientais físicas e químicas e a presença de microrganismos indicadores e patogênicos, utilizando modelos estatísticos de regressão logística binária.

A base de dados foi composta de forma contínua entre 01 de julho e 30 de dezembro de 2024, totalizando 182 dias de operação, dos quais 176 dias foram considerados válidos, após exclusão dos períodos destinados à manutenção programada mensal dos sensores IoT utilizados.

A variável dependente foi definida de forma dicotômica, considerando a ausência (0) ou presença (1) dos seguintes microrganismos: Clostrídios sulfito redutores, *Clostridium*

perfringens, Coliformes Totais, *Pseudomonas aeruginosa*, Enterococos e *Escherichia coli*. Para cada microrganismo, foi ajustado um modelo estatístico independente.

As variáveis independentes, inicialmente consideradas em todos os modelos, corresponderam aos parâmetros físico-químicos da água: potencial hidrogeniônico (pH), temperatura (°C), sólidos totais dissolvidos (STD, mg/L), condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), salinidade (ppt), cor aparente (uH) e turbidez (NTU).

Assim, dados físico-químicos foram coletados a partir de um sistema de monitoramento remoto da qualidade da água e cruzados com dados microbiológicos, obtidos por análises realizadas na Estação de Biologia Molecular da empresa Consta Serviço de Análise de Água Ltda, em João Pessoa/PB.

Além do exposto, foram utilizados dados secundários de saúde de alunos do município de Itabaiana/PB, obtidos por meio do sistema e-SUS Atenção Primária à Saúde (e-SUS APS), disponibilizado pelo Sistema de Informação em Saúde para a Atenção Primária (SISAPS) do Ministério da Saúde. As informações foram coletadas a partir da base pública acessível no endereço eletrônico do e-SUS APS, que consolida registros provenientes das ações desenvolvidas na Atenção Primária à Saúde, incluindo dados relacionados ao acompanhamento da saúde da população escolar (BRASIL, 2025).

A utilização desses dados permitiu a análise de indicadores de saúde de forma agregada, sem identificação individual dos estudantes, garantindo a confidencialidade das informações e atendendo aos preceitos éticos aplicáveis à pesquisa com dados secundários de domínio público.

Análise Físico-química

Conforme citado anteriormente, a coleta de dados dos parâmetros físico-químicos da água foi realizada por meio de uma plataforma automatizada de monitoramento, baseada na integração de sensores multiparamétricos, tecnologia de Internet das Coisas (IoT) e processamento digital dos dados (DA SILVA e SOUZA, 2025). O procedimento metodológico foi conduzido de forma padronizada, visando assegurar a confiabilidade, a rastreabilidade e a reprodutibilidade das medições ao longo do período de monitoramento.

As medições de potencial hidrogeniônico (pH) e temperatura (°C) foram efetuadas in situ, utilizando sensores eletroquímicos calibrados previamente com soluções padrão certificadas, conforme recomendações técnicas usuais para monitoramento de qualidade da água. A

temperatura foi registrada simultaneamente às demais variáveis, de modo a permitir a correção automática de parâmetros dependentes, como condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.

A condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) foi determinada por sensor condutivimétrico, baseado na medição da capacidade da água em conduzir corrente elétrica, sendo os valores compensados automaticamente pela medição da temperatura. A partir dos dados de condutividade, o sistema realizou o cálculo indireto dos sólidos totais dissolvidos (STD, mg/L), utilizando fatores de conversão, amplamente empregados em estudos de monitoramento ambiental. De forma semelhante, a salinidade (ppt) foi estimada a partir da relação entre condutividade elétrica e concentração iônica, permitindo a avaliação do grau de mineralização da água monitorada.

Os dados referentes à cor aparente (uH) e à turbidez (NTU) foram obtidos por sensores ópticos de campo, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - AK405/AKSO e AK410/AKSO utilizados na pesquisa



Fonte: dos autores (2026).

A turbidez foi medida com base na dispersão da luz causada por partículas em suspensão na amostra, enquanto a cor aparente foi estimada a partir da absorção óptica, considerando o efeito combinado de substâncias dissolvidas e particuladas.

Os dados obtidos foram transmitidos automaticamente via rede de comunicação IoT para a plataforma digital, onde foram processados, armazenados e validados por rotinas computacionais desenvolvidas especificamente para o projeto. Esse procedimento metodológico possibilitou o acompanhamento contínuo da qualidade da água, com baixo tempo de resposta, elevada confiabilidade e adequada consistência dos dados físico-químicos coletados.

Análise Microbiológica Molecular

O controle biológico das amostras, com a finalidade de validar a qualidade microbiológica da água, foi realizado in vitro por meio da técnica de reação em cadeia da polimerase em multiplex (PCR-Multiplex). Inicialmente, as amostras foram submetidas à extração de DNA genômico, empregando-se protocolo baseado em lise celular química e purificação por colunas de sílica, conforme recomendações padronizadas para amostras ambientais aquosas. A concentração e a pureza do DNA extraído foram determinadas por espectrofotometria no ultravioleta-visível (UV-Vis), utilizando-se o espectrofotômetro modelo K37-UVVIS/KASVI, como visto na Figura 2.

Figura 2 – Espectrofotômetro UV-Vis modelo K37-UVVIS/KASVI utilizado na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As amostras de DNA foram analisadas por meio da leitura das absorbâncias nos comprimentos de onda de 260 nm e 280 nm, permitindo a estimativa da concentração de ácidos nucleicos e a avaliação da presença de contaminantes proteicos. A qualidade do DNA foi verificada com base na razão A_{260}/A_{280} , sendo considerados adequados para as análises subsequentes os valores compreendidos entre 1,8 e 2,0, conforme critérios amplamente adotados na literatura para indicar elevada pureza do material genético. Essa etapa assegurou a confiabilidade dos procedimentos moleculares realizados posteriormente na pesquisa.

As reações de PCR Multiplex foram realizadas com o objetivo de promover a amplificação simultânea de sequências-alvo específicas de microrganismos indicadores de segurança hídrica, utilizando um termociclador modelo K33-10TG/KASVI, visto na Figura 3.

Figura 3 – Termociclador modelo K33-10TG/KASVI utilizado na pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2026).

As misturas reacionais foram preparadas contendo tampão apropriado, cloreto de magnésio ($MgCl_2$), desoxinucleotídeos trifosfatados (dNTPs), primers específicos para cada alvo molecular, DNA molde e Taq DNA polimerase. O termociclador foi empregado para controlar de forma precisa as etapas de desnaturação, anelamento e extensão, conforme parâmetros previamente otimizados, assegurando a especificidade, a eficiência da amplificação e a reprodutibilidade das reações, elementos essenciais para a confiabilidade dos resultados obtidos. A análise dos produtos amplificados (amplicons) foi realizada por eletroforese em gel de agarose e poliacrilamida, utilizando-se a Cuba Vertical de Eletroforese modelo K33-10V/KASVI, visto na Figura 4.

Figura 4 – Cuba Vertical de Eletroforese modelo K33-10V/KASVI utilizada na pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2026).

A corrida eletroforética dos géis de agarose foi realizada utilizando-se a mini fonte de eletroforese modelo K33-300M/KASVI, conforme mostrado na Figura 5, empregada para o fornecimento de tensão e corrente elétricas estáveis e controladas durante o processo de separação dos fragmentos de DNA.

Figura 5 – a mini fonte de eletroforese modelo K33-300M/KASVI utilizada na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria (2026).

O uso da mini fonte de eletroforese permitiu a manutenção de condições eletroforéticas reprodutíveis, assegurando a migração adequada dos fragmentos conforme seu tamanho

molecular. Os géis, previamente preparados em concentrações compatíveis com o tamanho esperado dos fragmentos de DNA e corados com agente intercalante, foram submetidos à corrida eletroforética sob parâmetros ajustados para evitar aquecimento excessivo e distorções nas bandas. Dessa forma, a utilização da mini fonte de eletroforese contribuiu para a obtenção de perfis eletroforéticos nítidos e confiáveis, possibilitando a adequada visualização e interpretação dos resultados após a corrida.

Os resultados obtidos pela PCR-Multiplex foram validados por PCR quantitativa em tempo real (qPCR), empregando sondas ou corantes fluorescentes específicos, conforme protocolos descritos na literatura. A qPCR permitiu confirmar a presença dos alvos genéticos e estimar a sensibilidade do método, sendo considerada a técnica de referência para detecção molecular de patógenos em amostras de água.

Em todas as etapas analíticas, foram incluídos controles positivos, constituídos por DNA padrão dos microrganismos-alvo, e controles negativos, compostos por água ultrapura livre de DNA, a fim de verificar a eficiência da amplificação e a ausência de contaminação cruzada. O limite de detecção (LOD) do método foi determinado a partir de diluições seriadas do DNA padrão, sendo considerado como a menor concentração detectável com reprodutibilidade consistente, conforme recomendações internacionais para análises microbiológicas moleculares em água.

A concordância entre os resultados obtidos pelos métodos PCR-Multiplex e qPCR foi avaliada estatisticamente por meio do teste do qui-quadrado (χ^2), adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

As sequências-alvo utilizadas no painel PCR-Multiplex foram previamente selecionadas e validadas in silício, contemplando microrganismos amplamente reconhecidos como indicadores de contaminação microbiológica da água destinada ao consumo humano. Os alvos incluíram: *Escherichia coli* (Ec/F: 5'-AGT(N)22GCA-3'; Ec/R: 5'-GGC(N)24ATG-3'; amplicon de 365 pb), *Enterococcus* spp. (Ent/F: 5'-AGA(N)25CAC-3'; Ent/R: 5'-TGG(N)28ATT-3'; amplicon de 270 pb), *Pseudomonas aeruginosa* (Pae/F: 5'-TCG(N)23CTA-3'; Pae/R: 5'-GCA(N)25GTA-3'; amplicon de 450 pb), *Clostridium sulfito redutores* (Csr/F: 5'-TGC(N)25CG-3'; Csr/R: 5'-CTC(N)26AAG-3'; amplicon de 150 pb) e *Clostridium perfringens* (Cpe/F: 5'-GGA(N)28AGT-3'; Cpe/R: 5'-GCG(N)25ACA-3'; amplicon de 210 pb).

Análise Estatística

A análise estatística foi conduzida por meio da regressão logística binária, técnica adequada para modelar desfechos dicotômicos e estimar a probabilidade de ocorrência de um evento em função de variáveis explicativas. A seleção das variáveis nos modelos finais foi realizada por procedimentos automáticos do tipo Stepwise, com base no teste de Wald, adotando-se os métodos Backward Stepwise (Wald) ou Forward Stepwise (Wald), conforme indicado para cada desfecho. Permaneceram nos modelos finais apenas as variáveis estatisticamente significativas.

Os resultados dos modelos foram expressos por meio dos coeficientes de regressão (β), erros-padrão, valores de significância estatística (p-valor), razões de chances (Odds Ratio – OR = $\text{Exp}(B)$) e respectivos intervalos de confiança de 95% (IC95%). A interpretação dos efeitos das variáveis independentes foi realizada considerando o impacto do aumento unitário e, adicionalmente, de incrementos maiores nas variáveis explicativas, utilizando a expressão $\text{OR} = e^{d\beta}$, a fim de facilitar a interpretação prática dos resultados.

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada por meio do teste de Hosmer–Lemeshow, adotando-se como critério de adequação valores de p superiores a 0,05, indicando concordância satisfatória entre os valores observados e os estimados pelo modelo.

Por fim, foi realizada uma análise descritiva das variáveis dependentes, com apresentação das frequências absolutas e relativas da presença e ausência de cada microrganismo, visando à caracterização da distribuição dos desfechos na população estudada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos encontram respaldo nos padrões estabelecidos pela legislação brasileira vigente para água destinada ao consumo humano (BRASIL, 2021). A aplicação da regressão logística evidenciou associações estatisticamente significativas entre variáveis físico-químicas da água e a presença de microrganismos indicadores de contaminação, confirmando o potencial dessas métricas como preditores indiretos de risco microbiológico. Os modelos ajustados apresentaram desempenho global adequado, conforme indicado pelos testes de Hosmer–Lemeshow ($p > 0,05$ em todos os desfechos), o que sugere adequação do ajuste e consistência estatística dos resultados obtidos; ou seja, todos os modelos apresentaram ajuste

adequado, indicando robustez estatística para inferência epidemiológica, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Avaliação do ajuste dos modelos de regressão logística para os diferentes desfechos microbiológicos.

Desfecho microbiológico	Método de seleção	Variáveis finais	Teste Hosmer–Lemeshow (p-valor)	Ajuste do modelo
Clostrídios sulfito redutores	Backward	STD Salinidade	> 0,05	Adequado
<i>Clostridium perfringens</i>	Forward	Cor	> 0,05	Adequado
Coliformes totais	Backward	STD	> 0,05	Adequado
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Backward	STD	> 0,05	Adequado
<i>Enterococcus</i> spp.	Forward	STD Salinidade	> 0,05	Adequado
<i>Escherichia coli</i>	Backward	STD Salinidade	> 0,05	Adequado

Fonte: Elaboração própria (2026).

De forma geral, os sólidos totais dissolvidos (STD) e a salinidade destacaram-se como as variáveis mais recorrentes nos modelos finais, independentemente do método de seleção (Backward ou Forward Stepwise). A manutenção dessas variáveis nos diferentes desfechos indica estabilidade estatística e relevância ambiental, reforçando seu uso como proxies de risco microbiológico em sistemas de monitoramento da qualidade da água. O aumento de STD eleva sistematicamente a probabilidade de detecção microbiológica, reforçando seu papel como proxy ambiental de contaminação.

Resultados semelhantes são amplamente reportados na literatura nacional e internacional, especialmente em contextos de pressão antrópica e aporte de efluentes, nos quais alterações físico-químicas refletem degradação da qualidade microbiológica (BENGANI, 2025; WANG et al., 2024; MADHU et al., 2019; OMS, 2019).

Para os clostrídios sulfito redutores, observou-se associação positiva tanto com o aumento de STD (OR = 1,021; IC95%: 1,006–1,036; p = 0,007) quanto com a salinidade (OR = 1,564; IC95%: 1,084–2,256; p = 0,017), conforme mostrado nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. Odds ratios (OR) estimados para a variável STD nos modelos finais.

Microrganismo	OR (STD)	IC95%	p-valor	Direção da associação
Clostrídios sulfito redutores	1,021	1,006–1,036	0,007	Positiva
Coliformes totais	1,029	1,011–1,046	0,001	Positiva
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,020	1,004–1,037	0,013	Positiva
<i>Enterococcus</i> spp.	1,026	1,012–1,041	<0,001	Positiva

Microrganismo	OR (STD)	IC95%	p-valor	Direção da associação
Escherichia coli	1,025	1,011–1,040	0,001	Positiva

Fonte: Elaboração própria (2026).

Esses resultados são particularmente relevantes, uma vez que esses microrganismos são reconhecidos como indicadores de contaminação fecal remota e persistente. Estudos brasileiros recomendam sua utilização como complemento aos indicadores tradicionais, sobretudo em avaliações de risco microbiológico de longo prazo, o que reforça a utilidade de variáveis físico-químicas como ferramentas auxiliares de vigilância (SILVA et al., 2025; BEILICCI & BEILICCI, 2022; RIZZATTI & MEDEIROS, 2020).

Resultados consistentes também foram observados para *Escherichia coli* e *Enterococcus* spp., microrganismos amplamente utilizados como indicadores de contaminação fecal em águas destinadas ao consumo humano e à recreação. Em ambos os casos, o aumento de STD e da salinidade elevou significativamente a probabilidade de detecção desses patógenos.

Tabela 3. Odds ratios (OR) estimados para a variável salinidade nos modelos finais.

Microrganismo	OR (Salinidade)	IC95%	p-valor
Clostrídios sulfito redutores	1,564	1,084–2,256	0,017
<i>Enterococcus</i> spp.	1,545	1,087–2,194	0,015
<i>Escherichia coli</i>	1,575	1,115–2,224	0,010

Fonte: Elaboração própria (2026).

Ademais, como pode ser observado na Tabela 3, a salinidade mostrou associação consistente com indicadores fecais, sugerindo influência de fontes antrópicas e condições ambientais favoráveis à persistência bacteriana. Nesta direção, o Conselho Nacional de Meio Ambiente vem considerando esta discussão tão importante para o contexto brasileiro, que estes microrganismos são explicitamente contemplados na Resolução CONAMA nº 357/2005, e a associação observada sugere que variáveis como STD e salinidade refletem condições ambientais favoráveis à sobrevivência, transporte e dispersão bacteriana, corroborando resultados nacionais recentes (HENRIQUE & XAVIER et al., 2023; GABERTI et al., 2025).

Também é possível observar que, no caso de *Pseudomonas aeruginosa*, apenas o STD permaneceu significativo no modelo final (OR = 1,020; IC95%: 1,004–1,037; p = 0,013). Esse resultado é coerente com estudos conduzidos no Brasil que associam a presença desse microrganismo oportunista a ambientes aquáticos com maior carga de sólidos dissolvidos, nutrientes e possíveis falhas operacionais em sistemas de abastecimento, destacando sua

relevância em saúde pública (BRASIL, 2011; USUGA & ACERO GODOY, 2025).

Para *Clostridium perfringens*, a variável cor da água apresentou associação estatisticamente significativa (OR = 1,424; IC95%: 1,064–1,907; p = 0,018). A cor está diretamente relacionada à presença de matéria orgânica dissolvida e substâncias húmicas, frequentemente associadas ao transporte e à proteção de microrganismos no meio aquático. Embora não seja um parâmetro microbiológico, a cor pode atuar como indicador indireto de contaminação e de eficiência limitada dos processos naturais de depuração, conforme apontado em estudos brasileiros e relatórios técnicos da ANA (CARDOSO, 2025; BRASIL, 2022; ANDRADE et al., 2022).

De forma integrada, os resultados obtidos corroboram evidências nacionais e internacionais que apontam a regressão logística e outras abordagens multivariadas como ferramentas robustas para avaliação do risco microbiológico da água. A incorporação desses modelos a sistemas de monitoramento contínuo — especialmente aqueles baseados em sensores e dados físico-químicos de fácil obtenção — pode subsidiar estratégias de alerta precoce, otimização de recursos analíticos e apoio à tomada de decisão. Tal abordagem é particularmente relevante em regiões com infraestrutura limitada para análises microbiológicas frequentes, alinhando-se às diretrizes da Política Nacional de Recursos Hídricos e aos programas de monitoramento da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (BRASIL, 2022; CUNHA & QUALHARINI, 2023).

Influência da Qualidade Microbiológica da Água e Doenças Vinculadas ao Hídrico

De acordo com os dados obtidos por meio do sistema e-SUS Atenção Primária à Saúde (e-SUS APS), incluindo dados relacionados ao acompanhamento da saúde da população escolar, no período compreendido entre julho de 2024 e junho de 2025, foram registrados atendimentos relacionados a doenças infecciosas associadas à água e ao ambiente, com destaque para dengue clássica (CID-10 A90 e CIAP-2 A77) conforme Tabela 4 no município de Itabaiana, estado da Paraíba.

Tabela 4. Distribuição dos casos de dengue clássica (CID-10 A90) por Unidade Básica de Saúde da Família (UBSF), Itabaiana/PB, julho/2024 a junho/2025

UBSF	Número de casos	Percentual (%)
Botafogo	1	25,0
Guarita	3	75,0
Total	4	100,0

Fonte: Elaboração própria (2026).

Os registros de dengue clássica (CID-10 A90) totalizaram 4 casos no período analisado, distribuídos entre as Unidades Básicas de Saúde da Família (UBSF) de Botafogo (1 caso) e Guarita (3 casos). Observou-se ocorrência pontual nos meses de julho, setembro e junho, com maior concentração de notificações na UBSF de Guarita.

Adicionalmente, foram identificados 2 casos classificados como “dengue e outras doenças virais não especificadas” (CIAP-2 A77), ambos registrados na UBSF de Brejinho, nos meses de julho e setembro de 2024.

Embora o número absoluto de casos seja reduzido, esses achados indicam circulação viral ativa no município, especialmente no segundo semestre de 2024, período historicamente associado ao aumento de criadouros do *Aedes aegypti* em decorrência de condições climáticas favoráveis.

Tabela 5. Distribuição temporal dos casos de dengue clássica (CID-10 A90) por mês de notificação, Itabaiana/PB

Mês/Ano	Número de casos
Julho/2024	1
Setembro/2024	1
Junho/2025	2
Total	4

Fonte: Elaboração própria (2026).

A relação entre dengue e água ocorre de forma indireta, uma vez que o armazenamento inadequado de água e a presença de recipientes com água parada favorecem a proliferação do vetor, sobretudo em áreas com abastecimento irregular (WHO, 2012). Assim, mesmo com baixa incidência registrada, os dados reforçam a necessidade de vigilância contínua e ações preventivas integradas ao saneamento ambiental.

No que se refere à amebíase (CID-10 A06), foram registrados 21 casos no período avaliado, distribuídos entre as UBSF Sítio Novo (13 casos), Costa e Silva (4 casos), Suburbana (2 casos) e Guarita (2 casos). Observou-se maior concentração de casos entre julho e dezembro de 2024, com pico no mês de julho, totalizando 9 notificações (Tabela 6).

Tabela 6. Distribuição dos casos de amebíase (CID-10 A06) por UBSF, Itabaiana/PB, julho/2024 a junho/2025

UBSF	Número de casos	Percentual (%)
Sítio Novo	13	61,9
Costa e Silva	4	19,0
Suburbana	2	9,5
Guarita	2	9,5
Total	21	100,0

Fonte: Elaboração própria (2026).

Além disso, foram identificados 2 casos de amebíase não especificada (CID-10 A06.9), registrados nas UBSF de Botafogo e Guarita, ambos ocorrendo em fevereiro de 2025.

A ocorrência desses registros sugere possíveis limitações diagnósticas ou dificuldades na diferenciação laboratorial entre espécies de *Entamoeba*, situação comum em serviços de atenção primária.

A maior incidência de amebíase em determinadas unidades pode estar associada a condições locais de saneamento, qualidade da água consumida e práticas de higiene, especialmente em populações infantis, conforme indicado pela predominância de faixas etárias entre menores de 1 ano até 14 anos nos filtros aplicados aos relatórios.

Estudos apontam que a ingestão de água contaminada por cistos de *Entamoeba histolytica* permanece como um importante mecanismo de transmissão em áreas com tratamento inadequado de água e esgoto (FOTEDAR; STARK, 2012; WHO, 2020). A coexistência de registros de amebíase e dengue evidencia um cenário epidemiológico caracterizado por vulnerabilidades ambientais e sanitárias, nas quais a água desempenha papel central, seja como veículo direto de transmissão (amebíase) ou como elemento ambiental que favorece a proliferação vetorial (dengue).

Embora os números absolutos sejam relativamente baixos, a distribuição espacial e temporal dos casos aponta para a necessidade de ações preventivas direcionadas, especialmente nas áreas cobertas pelas UBSF com maior número de notificações (Tabela 7).

Tabela 7. Distribuição mensal dos casos de amebíase (CID-10 A06), Itabaiana/PB

Mês/Ano	Número de casos
Julho/2024	9
Agosto/2024	4
Setembro/2024	3
Outubro/2024	3
Novembro/2024	1
Dezembro/2024	1

Mês/Ano	Número de casos
Total	21

Fonte: Elaboração própria (2026).

Esses resultados reforçam achados da literatura que associam a ocorrência de doenças infecciosas à qualidade da água, à gestão inadequada do abastecimento e à insuficiência de infraestrutura sanitária, fatores que impactam diretamente a saúde coletiva (HUNTER et al., 2010; WHO, 2017).

Destaca-se como limitação do presente estudo a dependência de dados secundários de notificação, os quais podem estar sujeitos à subnotificação, erros de classificação diagnóstica e ausência de confirmação laboratorial em alguns casos, especialmente para amebíase não especificada. Ainda assim, os registros analisados constituem importante ferramenta para o planejamento de ações de vigilância em saúde e para a avaliação de riscos associados à água e ao ambiente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados descritos neste trabalho demonstram que variáveis físico-químicas da água, especialmente os sólidos totais dissolvidos (STD) e a salinidade, apresentam associações estatisticamente significativas e consistentes com a presença de microrganismos indicadores de contaminação, confirmando seu potencial como proxies ambientais de risco microbiológico. O adequado desempenho dos modelos de regressão logística, evidenciado pelos testes de Hosmer–Lemeshow, reforça a robustez estatística das inferências realizadas e a aplicabilidade dessa abordagem na avaliação da qualidade da água, sobretudo em contextos nos quais o monitoramento microbiológico contínuo é limitado por restrições operacionais ou financeiras.

A recorrência de STD e salinidade nos modelos finais para diferentes desfechos microbiológicos indica estabilidade e relevância ambiental dessas variáveis, corroborando evidências nacionais e internacionais que apontam a degradação físico-química da água como reflexo de pressões antrópicas e fator associado ao aumento do risco sanitário. Adicionalmente, a associação da cor da água com a presença de *Clostridium perfringens* evidencia a utilidade de parâmetros não microbiológicos como indicadores indiretos de contaminação e de eficiência limitada dos processos naturais ou operacionais de depuração.

De forma integrada, a análise epidemiológica baseada em dados do sistema e-SUS APS

revelou a ocorrência de doenças infecciosas relacionadas direta ou indiretamente à água e ao ambiente, com destaque para amebíase e dengue, no município de Itabaiana/PB. Embora os números absolutos de casos sejam relativamente baixos, a distribuição temporal e espacial das notificações sugere a persistência de vulnerabilidades ambientais e sanitárias, especialmente em áreas com possíveis limitações de saneamento, qualidade da água e práticas de higiene. A coexistência dessas enfermidades reforça o papel central da água tanto como veículo direto de transmissão de patógenos quanto como elemento ambiental favorável à proliferação vetorial.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a utilização de dados secundários de notificação, sujeitos à subnotificação, imprecisões diagnósticas e ausência de confirmação laboratorial em alguns registros, particularmente nos casos de amebíase não especificada. Ainda assim, os resultados podem fornecer subsídios relevantes para o planejamento de ações de vigilância em saúde, para o fortalecimento de estratégias preventivas integradas ao saneamento ambiental e para a incorporação de modelos preditivos baseados em parâmetros físico-químicos nos sistemas de monitoramento da qualidade da água.

Por fim, conclui-se que a integração entre análises ambientais e epidemiológicas constitui uma abordagem promissora para a gestão do risco sanitário associado à água, contribuindo para a tomada de decisão em saúde pública e para o aprimoramento das políticas de recursos hídricos e saneamento, especialmente em municípios de pequeno e médio porte.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022**. Brasília: ANA, 2022.

AHMED, J. et al. **Quantitative microbial risk assessment of drinking water quality to predict the risk of waterborne diseases in primary-school children**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 8, art. 2774, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17082774.

AHMED, U. et al. **Machine learning techniques for water quality prediction and assessment: a systematic review**. *Journal of Environmental Management*, v. 311, p. 114821, 2022.

ALOTAIBI, E.; NASSIF, N. **Artificial intelligence in environmental monitoring: an in-depth analysis**. *Discover Artificial Intelligence*, v. 4, art. 84, 2024. DOI: 10.1007/s44163-024-00198-1.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2018.

ANDRADE, P. R.; SILVA, R. A.; MENDES, T. J. **Avaliação físico-química da água tratada em estação de filtração direta no centro-sul cearense**. *Revista Engenharia Ambiental*, v. 2, p. 145–160, 2022.

ANDRÉ, A. C. L.; AMORIM, M. C. C. de; SILVA, K. C. D. M. da. **Mapeamento tecnológico de sensores e sistemas IoT para monitoramento da qualidade da água e efluentes no setor de saneamento: análise de patentes**. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 19, n. 57, p. 114–124, 2023.

ARAÚJO, D. L.; ANDRADE, R. F. **Qualidade físico-química e microbiológica da água utilizada em bebedouros de instituições de ensino no Brasil: revisão sistemática da literatura**. *Brazilian Journal of Health Review*, v. 3, n. 4, p. 7301–7324, 2020.

BÁRTA, R. L. et al. **Qualidade da água para consumo humano no Brasil: revisão integrativa da literatura**. *Vigilância Sanitária em Debate*, v. 9, n. 4, p. 74–85, 2021.

BARBOSA, A. **Antes com a lama era difícil: as transformações da LMG-760 no âmbito socioambiental decorrentes de sua pavimentação**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 12, n. 1, e18760, 2023.

BARCELLOS, L. G. **Controle microbiológico da água: potencial das análises de sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica como métodos auxiliares no monitoramento da degradação da qualidade da água**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

BERGMANN, A. C. **O papel do Brasil no comércio internacional de água virtual: uma análise insumo-produto**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2019.

BORGES, S. M. et al. **Água tratada: um estudo sobre o tratamento de água na cidade de Anápolis**. *Brazilian Journal of Health Review*, v. 6, n. 5, p. 25917–25932, 2023.

BRASIL. **Decreto nº 79.367, de 9 de março de 1977**. Dispõe sobre normas e padrões de potabilidade da água. *Diário Oficial da União*: Brasília, 1977.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. *Diário Oficial da União*: Brasília, 1997. Disponível em: <https://www.gov.br/saude>. Acesso em: 2 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 15.276, de 28 de novembro de 2025**. Altera a Lei nº 9.394/1996 e a Lei nº 11.947/2009 para garantir água potável e infraestrutura sanitária adequada nas instituições de ensino públicas. *Diário Oficial da União*: Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/saude>. Acesso em: 12 dez. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso

em: 12 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano. Diário Oficial da União: Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/saude>. Acesso em: 2 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Guia de vigilância em saúde**. Brasília: Ministério da Saúde, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/saude>. Acesso em: 2 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua)**. Brasília: Ministério da Saúde, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/saude>. Acesso em: 2 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. **e-SUS Atenção Primária à Saúde (e-SUS APS)**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, s.d. Disponível em: <https://sisaps.saude.gov.br/sistemas/esusaps/>. Acesso em: 5 jan. 2026.

CAMARGO, E. T. et al. **Low-cost water quality sensors for IoT: a systematic review**. *Sensors*, v. 23, art. 4424, 2023. DOI: 10.3390/s23094424.

CARDOSO, P. **Qualidade da água tratada em sistema de filtração direta ascendente**. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 18, e22354, 2025.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). **Parasites – Ascariasis (Ascaris infection)**. Atlanta, 2022. Disponível em: <https://www.cdc.gov>. Acesso em: 2 jan. 2026.

COLET, C. et al. **Qualidade microbiológica e perfil de sensibilidade a antimicrobianos em águas de poços artesianos**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, p. 683–690, 2021.

FOTEDAR, R.; STARK, D. **Beating *Entamoeba histolytica*: new insights into treatment**. *Current Opinion in Infectious Diseases*, v. 25, n. 5, p. 480–485, 2012.

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S.; STURDIVANT, R. X. **Applied logistic regression**. 3. ed. New York: Wiley, 2013.

HUNTER, P. R. et al. **Waterborne diseases**. *Emerging Infectious Diseases*, v. 16, n. 2, p. 210–215, 2010.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Demanda futura por água no Brasil até 2050**. São Paulo, 2025.

LABED, H. et al. ***Pseudomonas aeruginosa* trapped in seawater salt survives for years and becomes salt resistant**. *BMC Microbiology*, v. 19, art. 149, 2019.

SILVA, J. A.; OLIVEIRA, R. M.; SOUZA, L. F. **Modelagem estatística aplicada à qualidade da água para consumo humano**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. 3, p. 1–12, 2020.

SILVA, J.; SOUZA, C. P. **Dispositivo de baixo custo baseado em internet das coisas para monitoramento remoto da qualidade da água destinada ao consumo humano. OKARA: Geografia em Debate (UFPB)**, v. 19, p. 107–126, 2025.

UNICEF. **Drinking water, sanitation and hygiene in schools: global baseline report**. New York: UNICEF, 2019.

YAROSHENKO, I. et al. **Real-time water quality monitoring with chemical sensors. Sensors**, v. 20, n. 12, art. 3432, 2020.

ZHANG, Y. et al. **Optimized logistic regression models for environmental quality classification. Environmental Systems Research**, v. 12, n. 1, p. 1–14, 2023.