

MONITORAMENTO REMOTO DA QUALIDADE DA ÁGUA: INOVAÇÕES, BENEFÍCIOS E DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE HÍDRICA

Rafael Francis Leite¹, Alexandre Claus²

Resumo: O monitoramento da qualidade da água migra de análises pontuais para sistemas remotos inteligentes em tempo real. Este trabalho avalia a implementação de monitoramento remoto no Paraná para transição da gestão hídrica reativa para ativa e conectada. A tecnologia integra sondas multiparamétricas de alta precisão, telemetria GPRS e inteligência de borda na vigilância de mananciais estratégicos. Inovações incluem uma célula de fluxo via impressão 3D para monitoramento multiponto e estações fixas/itinerantes/flutuantes feitas com materiais reaproveitados. A metodologia híbrida combina monitoramento contínuo de alta frequência com amostragem inteligente, usando gatilhos automáticos para coletas em eventos críticos (análises de DBO e Coliformes). Resultados preliminares mostram que o sistema age como sentinela tecnológica, detectando proativamente florações algais e picos de contaminação, reduzindo custos operacionais (OPEX) e riscos ocupacionais. A consolidação dessa tecnologia como um "Gêmeo Digital" hídrico fortalecerá a resiliência do abastecimento e garantirá a segurança hídrica conforme a normativa.

Abstract: Water quality monitoring is shifting from point-in-time sampling toward real-time intelligent remote systems. This study evaluates the implementation of remote monitoring in Paraná, Brazil, facilitating the transition from reactive to active and connected water management. The technology integrates high-precision multiparameter probes, GPRS telemetry, and edge computing for the surveillance of strategic water sources. Innovations include a 3D-printed flow cell for multi-point monitoring and fixed, mobile, and floating stations constructed from repurposed materials. The hybrid methodology combines high-frequency continuous monitoring with smart sampling, utilizing automatic triggers for collection during critical events (enabling BOD and Coliform analysis). Preliminary results indicate that the system acts as a technological sentinel, proactively detecting algal blooms and contamination spikes while reducing operational expenditures (OPEX) and occupational risks. Consolidating this technology as a water "Digital Twin" will strengthen supply resilience and ensure water security in compliance with regulatory standards.

Palavras-Chave: Monitoramento da qualidade da água em tempo real, Gêmeo Digital hídrico, Modelagem da Qualidade da Água

Keywords: Real-time Water Quality Monitoring, Water Digital Twin, Water Quality Modeling

INTRODUÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos representa um dos maiores desafios contemporâneos para a saúde pública e a preservação ambiental, especialmente em regiões de intensa atividade antropogênica. No estado do Paraná, a implementação deste projeto fundamenta-se em frentes estratégicas voltadas para a inovação tecnológica e a segurança hídrica, buscando transitar de um modelo de monitoramento reativo para um ecossistema de inteligência ativa e conectada.

Historicamente, o monitoramento da qualidade da água baseia-se em amostragens pontuais e análises laboratoriais que, embora normativamente necessárias, funcionam como "fotografias estáticas" de um corpo hídrico. Essa metodologia ainda apresenta limitações críticas, como a incapacidade de capturar eventos transientes de poluição ou florações algais súbitas, o que compromete a agilidade na tomada de decisões operacionais em Estações de Tratamento de Água (ETA) e Esgoto (ETE).

Integrado ao Saneamento 5.0, este projeto utiliza sondas multiparamétricas e inteligência de borda para monitoramento hídrico contínuo. Justifica-se pela necessidade de gestão integrada que garanta conformidade ambiental e proteção de ativos essenciais para abastecimento, lazer e energia. O sistema monitora a eficiência do tratamento de efluentes em Itaipulândia e Medianeira e detecta riscos biológicos e químicos em tempo real, otimizando o OPEX e fortalecendo a resiliência hídrica contra urbanização e mudanças climáticas.

O estudo e ações, fruto de um convênio tripartite (Sanepar, Itaipu Binacional e Itaipu Parquetec) de 2020, visam universalizar o saneamento básico e implementar monitoramento hídrico na área de influência do reservatório de Itaipu, focando em saúde pública e preservação ambiental. Inclui também o Reservatório Alagados (Ponta Grossa/PR), estratégico para o abastecimento regional e de controle rigoroso. Um diferencial é a parceria com o PPGMAUI/UFPR, que integra a expertise operacional da Sanepar com o rigor científico acadêmico. O objetivo é validar soluções tecnológicas de baixo custo e alta eficiência para o monitoramento contínuo de corpos hídricos, garantindo a sustentabilidade das inovações.

MÉTODOS

A metodologia utiliza o conceito de Saneamento 5.0, integrando tecnologias digitais e automação para gestão preditiva de mananciais. O sistema, autônomo para vigilância hídrica ininterrupta, baseia-se em instrumentação avançada, telemetria e autonomia energética. A pesquisa abrange regiões estratégicas do Paraná com diferentes corpos hídricos e pressões ambientais. O delineamento experimental possui duas frentes para testar a versatilidade do monitoramento sob distintos regimes hidrológicos e operacionais.

O estudo inicial focou no Oeste do Paraná (Itaipulândia e Medianeira, Bacia do Paraná). O objetivo principal foi implementar monitoramento em tempo real nos rios Ocoí e Alegria, a jusante das ETES locais. A escolha visa avaliar a dispersão e o impacto ambiental dos efluentes tratados (detalhado na Figura 1a). Esse monitoramento é vital para o controle da poluição hídrica e a gestão sustentável dos recursos hídricos na Bacia do Rio Paraná, permitindo resposta rápida a anomalias e subsidiando políticas públicas regionais.

Numa segunda fase do projeto, o escopo do estudo foi ampliado, estendendo-se à significativa região dos Campos Gerais. Nesta etapa, a atenção foi direcionada ao Reservatório Alagados, que abastece a cidade de Ponta Grossa. O modelo de monitoramento aplicado a este reservatório assume uma natureza predominantemente preventiva e analítica. Tal ênfase é justificável pela importância crítica deste manancial, que é a principal fonte de abastecimento público de água para uma grande parte da população regional. O monitoramento contínuo em Alagados (cujas especificações técnicas e pontos de coleta estão detalhados na Figura 1b) permite a detecção precoce de alterações na qualidade da água, possibilitando a adoção de medidas corretivas antes que o manancial seja comprometido, garantindo assim a segurança hídrica e a saúde pública

da região. A análise neste local inclui a avaliação de parâmetros físico-químicos e biológicos que são cruciais para a potabilidade e a integridade ecológica do ecossistema lacustre.

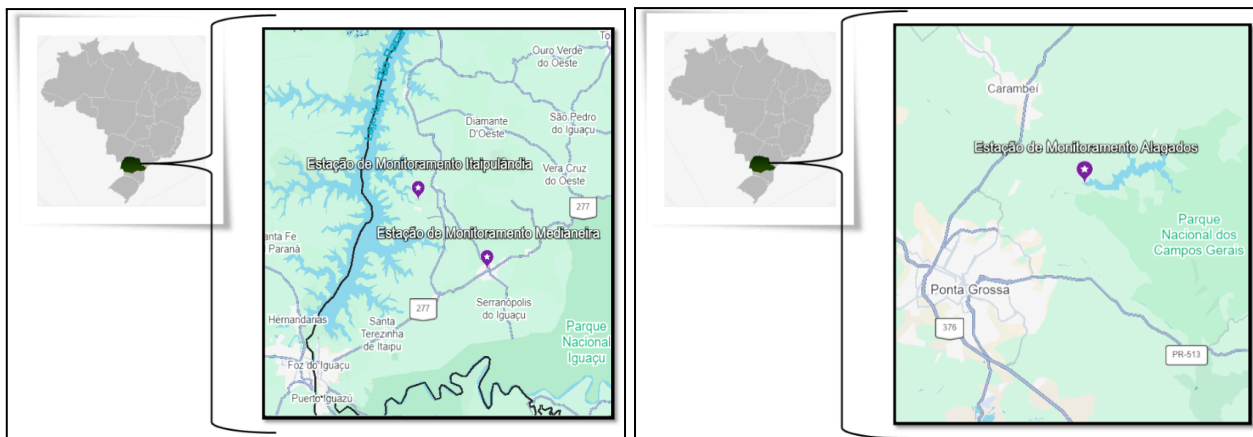


Figura 01(a): Localização dos pontos de monitoramento contínuo em Itaipulândia/Pr e Medianeira/Pr

Figura 01(b): Localização dos pontos de monitoramento contínuo em Ponta Grossa/Pr

Fonte: Google/O autor (2026)

Esta área foca na captura de instabilidades hídricas, detectando precocemente florações algais e mapeando Geosmina e MIB (compostos de odor e gosto) em reservatórios. A tecnologia, validada em cenários diversos (de monitoramento de efluentes em rios a vigilância limnológica em grandes reservatórios), é robusta e replicável. O sistema de monitoramento móvel e autônomo (Leite et al., 2023) é de baixo custo e alta eficiência, consolidando sua aplicabilidade em múltiplos contextos de gestão hídrica e saneamento no Brasil.

Para a avaliação da qualidade da água, utilizam-se sondas multiparamétricas EXO (Xylem) para medições *in situ* de alta precisão. A sonda mede pH, temperatura, potencial de oxirredução, oxigênio dissolvido, condutividade, salinidade, sólidos totais dissolvidos e turbidez. O monitoramento é contínuo, com coleta de dados georreferenciados a cada 10 minutos, conforme metodologias de referência (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2017).

A infraestrutura de monitoramento adota inteligência de borda (edge computing), com datalogger processando sinais de sensores localmente, armazenando dados brutos e garantindo integridade. O fluxo de dados é digitalizado, da aquisição física pela sonda multiparâmetros à disponibilização de informações refinadas para suporte à decisão, viabilizado pela integração de hardware e software especializados.

Componentes	Descrição Técnica
Datalogger (CR800)	Unidade central da gestão dos dados dos instrumentos e encaminhamento ao modem GPRS.
Modem GPRS	Dispositivo encarregado da transmissão dos dados processados via rede de telefonia celular.
Sonda Multiparamétrica	Equipamento destinado às medições dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água.
Software LoggerNet	Sistema de gerenciamento utilizado para configuração de tabelas e parâmetros do datalogger.
Controlador de Carga	Gerencia a energia do painel solar para carga da bateria e alimentação do sistema (12V).

Tabela 01: Componentes do sistema de monitoramento remoto.

Fonte: Google/O autor (2026)

O módulo de monitoramento utiliza sonda multiparâmetros (indicadores físico-químicos) e sensor hidrostático (profundidade). O datalogger, configurado via LoggerNet, gerencia e envia dados remotamente por modem GPRS. A alimentação é fotovoltaica (painéis/controladores) para autonomia da bateria 12V. Os dados transmitidos são processados e validados em nuvem, e visualizados em tempo real por dashboards/aplicativos móveis, auxiliando na gestão de eventos

críticos e vigilância hídrica (detalhes na Figura 2). Para operação em áreas remotas, está em desenvolvimento um sistema com autonomia energética ininterrupta e sustentável, provida por painéis fotovoltaicos e controladores de carga.

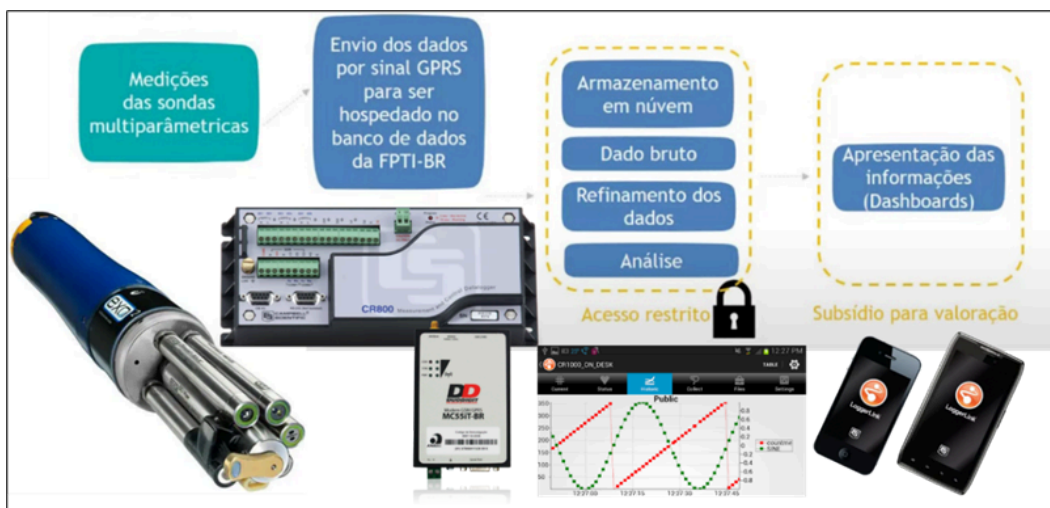


Figura 02: Fluxograma que exemplifica o funcionamento do Sistema utilizado
Fonte: O autor (2026)

O monitoramento inteligente utilizou uma célula de fluxo desenvolvida via impressão 3D, superando limitações de custo para viabilizar análises multiponto. Esta tecnologia permite que uma única sonda monitore alternadamente o efluente em diferentes pontos ou profundidades através de bombeamento temporizado, otimizando o investimento e mapeando a estratificação térmica e química. O sistema também possui amostragem inteligente, em que o datalogger atua como um gatilho: variações anômalas (como picos de turbidez) disparam automaticamente um alerta para coleta de amostras físicas complementares para análises laboratoriais de compostos complexos.

Para conferir maior versatilidade à rede de vigilância, estão sendo desenvolvidas Estações de Monitoramento Itinerantes, que permitirão a mobilidade da infraestrutura para atender demandas específicas em locais distintos sem a necessidade de instalações fixas permanentes. A automação integrada a essas unidades possibilita uma redução drástica no OPEX logístico, eliminando deslocamentos frequentes de equipes técnicas e reduzindo a exposição dos colaboradores a riscos biológicos ou acidentes em áreas de difícil acesso.

Complementarmente, a Estação Remota Flutuante surge como uma alternativa móvel para monitorar trechos remotos dos corpos hídricos que habitualmente não seriam vigiados, proporcionando uma visão diagnóstica abrangente ao longo do curso do rio. O sistema consiste em uma sonda multiparamétrica acoplada a uma estrutura flutuante em formato de "H", que funciona como um "pequeno laboratório" embarcado para abrigar dispositivos de telemetria, destacando-se por sua manufatura sustentável baseada no reaproveitamento de materiais e elevada eficiência financeira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O monitoramento automático tem permitido a detecção rápida de alterações na qualidade da água e a geração de um banco de dados contínuo ("filme em tempo real"), superior à amostragem convencional intermitente. A transição para o modelo Saneamento 5.0 representa uma mudança de

paradigma na gestão de mananciais, evoluindo de um monitoramento passivo para um ecossistema de inteligência ativa e conectada. Enquanto os métodos tradicionais limitam-se à conformidade normativa, o sistema que estamos utilizando atua como uma sentinela tecnológica, integrando infraestrutura física e inteligência de dados para antecipar crises e otimizar processos operacionais. As melhorias disruptivas introduzidas em nosso sistema, tem permitido avanços em termos de resolução temporal, logística e capacidade analítica estão sintetizadas na Tabela 2.

Característica	Monitoramento Convencional	Monitoramento Remoto (Saneamento 5.0)
Frequência de Dados e Resolução Temporal	Amostragem pontual (mensal ou semanal), funcionando como uma "fotografia estática" que pode omitir eventos críticos de poluição.	Coleta contínua em intervalos regulares programáveis (ex.: a cada 10 minutos), funcionando como um "filme em tempo real" que identifica tendências e mudanças bruscas.
Metodologia de Coleta	Processo manual, estritamente dependente de logística e deslocamento físico de equipes.	Processo automático e remoto, realizado via telemetria GPRS e tecnologia satelital.
Deteção de Algas	Dependente de contagem laboratorial e inspeção visual, processos que demandam tempo.	Utilização de sensores bio-ópticos in situ para detecção imediata de Ficocianina e Clorofila.
Gestão de Crises	Abordagem reativa; os ajustes no tratamento ocorrem somente após a detecção do problema na ETA.	Abordagem preditiva; o sistema fornece alertas precoces que permitem manobras operacionais preventivas.

Tabela 2 – Comparativo técnico-operacional: Monitoramento Convencional versus Aqua Sentry
Fonte: O autor (2026)

A instalação das estações de monitoramento em Itaipulândia/PR é estratégica para acompanhar o impacto das melhorias de saneamento nos corpos hídricos locais, especialmente nos rios que deságuam no reservatório de Itaipu. A localização é mostrada na Figura 3.



Figura 3. Localização da estação de monitoramento em Itaipulândia/Pr.
Fonte: O autor 2026.

O monitoramento remoto é crucial para a preservação ecológica e da biodiversidade aquática, combatendo pressões antrópicas. Sua vigilância contínua detecta precocemente poluição/degradação, permitindo respostas rápidas. A infraestrutura (caixa de passagem e tubulação), instalada sobre bases de concreto com parafusos industriais e travas de segredo (Figura 4), visa facilitar a manutenção e garantir a segurança do sistema.

As estações operam de forma ininterrupta e autônoma, utilizando painéis fotovoltaicos para energia limpa, eliminando a dependência da rede. Soluções de engenharia e construção foram integradas para melhorar a qualidade e segurança na operação e manutenção.



Figura 4. A infraestrutura consiste na caixa de passagem da sonda, que inclui a tubulação (ilustrada à esquerda), o painel de telemetria e o sistema fotovoltaico, utilizado para o fornecimento de energia (imagem à direita).
Fonte: O autor 2026.

Em Medianeira/PR, o monitoramento moderniza o saneamento. Em parceria com a Itaipu Binacional, uma nova ETE avançada está em construção para remover carga orgânica e nutrientes, protegendo o Rio Alegria, manancial de abastecimento e corpo receptor. A pesquisa delineou um monitoramento comparativo (montante e jusante) ao descarte da ETE Alegria para quantificar a eficiência do saneamento e a capacidade de autodepuração do rio (Figura 5).

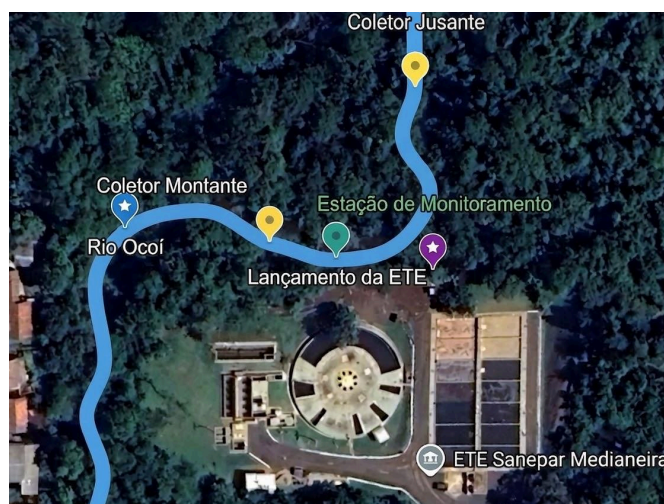


Figura 5. Detalhes dos locais de amostragem a montante e a jusante
Fonte: O autor 2026.

A amostragem (referência a montante e jusante) estabelece a qualidade hídrica basal e avalia a influência do efluente tratado, garantindo conformidade com o CONAMA nº 357/2005. Esta configuração binária apoia a gestão da ETE e a proteção hídrica. A metodologia empregada envolve o uso de uma célula de fluxo contínuo e uma sonda multiparâmetros com bombeamento temporizado, conforme detalhado na figura 6. Essa abordagem visa otimizar o uso de equipamentos de custo elevado, mapear a dispersão de poluentes de forma eficaz, contribuir para a redução do CAPEX e, consequentemente, aumentar a replicabilidade do processo.

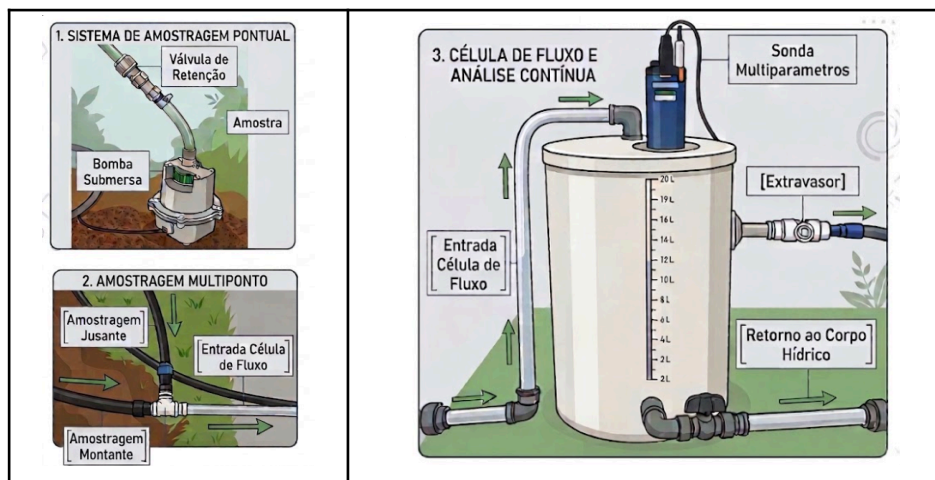


Figura 6. Fluxograma exemplificativo do processo de monitoramento utilizando uma célula de fluxo.

Fonte: O autor 2026

As unidades de monitoramento itinerantes representam um avanço tecnológico na vigilância ambiental, proporcionando mobilidade para atender a demandas temporárias em corpos hídricos que não possuem instalações fixas (conforme ilustrado na Figura 7). Sua automação e telemetria integradas são cruciais, pois eliminam a necessidade de coletas manuais, reduzindo o OPEX logístico e assegurando a transmissão contínua de dados. Tais unidades configuram-se como uma solução estratégica e altamente flexível, essencial para a gestão ágil da qualidade da água e a efetiva preservação ambiental.

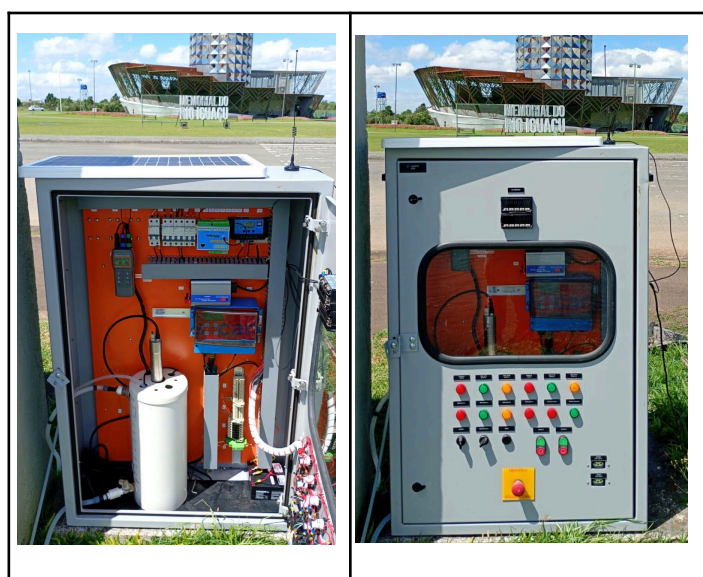


Figura 7. Estação de monitoramento da qualidade da água itinerante em desenvolvimento.

Fonte: O autor 2026

A Estação Remota Flutuante é uma alternativa móvel e versátil que complementa infraestruturas fixas, permitindo a vigilância remota de corpos hídricos para diagnóstico da qualidade da água. Sua arquitetura de baixo custo emprega uma sonda multiparamétrica em conjunto com uma estrutura flutuante em formato de "H" (figura 8) para realizar a telemetria e o armazenamento dos dados. A inovação é um modelo de manufatura sustentável, alinhado à economia circular, que utiliza sobras de tubos de PVC para produzir flutuantes, gerando uma economia superior a 90% (custo estimado inferior a R\$ 1.000,00, contra R\$ 8.000,00 a R\$ 25.000,00 para flutuantes industriais). Essa redução de CAPEX é crucial para tornar o monitoramento hídrico em tempo real mais acessível e expandir sua cobertura.



Figura 8. Estação de monitoramento da qualidade da água flutuante.
Fonte: O autor 2026.

CONCLUSÃO

A implementação do sistema de monitoramento remoto representará um salto qualitativo na governança dos recursos hídricos, permitindo a transição de um modelo reativo para uma vigilância ambiental preditiva, digitalizada e resiliente. Esta tecnologia, consolidada como um "Gêmeo Digital" (Digital Twin) do manancial, possibilita a detecção em tempo real de anomalias e florações algais, garantindo o rigoroso cumprimento da Resolução CONAMA nº 357/2005 e fortalecendo a segurança hídrica ao atuar como uma barreira epidemiológica para a saúde pública. No âmbito social e operacional, a automação via telemetria democratiza o acesso à informação e reduz drasticamente os riscos ocupacionais ao minimizar a necessidade de coletas manuais em áreas remotas ou de difícil acesso. Economicamente, a integração entre inovação tecnológica e engenharia de baixo custo — exemplificada pelo uso de estações flutuantes de PVC reaproveitado — otimiza tanto o investimento de capital (CAPEX) quanto os custos operacionais (OPEX), transformando a eficiência em sustentabilidade econômica de longo prazo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento à Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial - PPGMAUI da Universidade Federal do Paraná - UFPR., à Itaipu Binacional e ao Itaipu Parquetec pelo apoio técnico e operacional essencial para o desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.

BRASIL. CONAMA nº 357/2005. Classificação e diretrizes ambientais para enquadramento dos corpos de água. Brasília, DF: MMA, 2005.

HART, J. K.; MARTINEZ, K. Environmental Sensor Networks: A revolution in earth system science? Earth-Science Reviews, v. 78, n. 3-4, p. 177-191, 2006.

LEITE, R. F. et al. Sistema autônomo de monitoramento de qualidade da água. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SILUBESA). Recife: ABES, 2023.