O SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DO MONITORAMENTO DAS ÁGUAS (SIGMA) COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA NO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS EM MINAS GERAIS

Katiane Cristina de Brito Almeida[1]; Mariana Elissa Vieira de Souza[2]; Matheus Duarte Santos[3]; Luisa Costa Martins Vieira[4]; Sérgio Pimenta Costa[5]; Vanessa Kelly Saraiva[6]

RESUMO

Este trabalho apresenta o Sistema Integrado de Gestão do Monitoramento das Águas (SIGMA), desenvolvido pelo IGAM, como ferramenta estratégica para a gestão de recursos hídricos em Minas Gerais. Atuando como um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), o sistema centraliza e organiza dados de qualidade e quantidade das águas. O SIGMA automatiza processos de planejamento, recebimento, validação e tratamento de dados, armazena séries históricas estruturadas, calcula indicadores de qualidade e gera produtos analíticos (tabelas, gráficos, relatórios) que apoiam a tomada de decisão em tempo hábil. Os resultados evidenciam um ganho de 89% na celeridade do processamento, reduzindo o tempo de resposta de 45 para 5 dias. Inovações como a integração quali-quanti permitem o cálculo automático de cargas poluentes, eliminando gargalos históricos e falhas manuais. O sistema estabelece fluxos auditáveis que garantem maior segurança técnica e jurídica institucional, além de fortalecer a transparência das informações do monitoramento. Conclui-se que a transição para o paradigma SIGMA consolida a inteligência organizacional, estabelecendo uma referência nacional para o monitoramento ambiental e para a segurança hídrica.

ABSTRACT

This paper presents the Water Monitoring Integrated Management System (SIGMA), developed by IGAM, as a strategic tool for water resources management in Minas Gerais. Functioning as a Decision Support System (DSS), the system centralizes and organizes water quality and quantity data. SIGMA automates planning, data reception, validation, and treatment processes, stores structured historical series, calculates quality indicators, and generates analytical products (tables, charts, reports) that support timely decision-making. Results demonstrate an 89% increase in processing speed, reducing response time from 45 to 5 days. Innovations such as quality-quantity integration enable automated calculation of pollutant loads, eliminating historical bottlenecks and manual errors. The system establishes auditable flows that ensure greater technical and legal institutional security, while strengthening the transparency of monitoring information. It is concluded that the transition to the SIGMA paradigm consolidates organizational intelligence, establishing a national reference for environmental monitoring and water security.

Palavras-Chave: Gestão de Recursos Hídricos; Monitoramento Ambiental; SIGMA/IGAM

[1]Analista Ambiental, IGAM/MG, katiane.brito@meioambiente.mg.gov.br
[2]Analista Ambiental, IGAM/MG, mariana.elissa@meioambiente.mg.gov.br
[3]Analista Ambiental, IGAM/MG, matheus.santos@meioambiente.mg.gov.br
[4]Analista Ambiental, IGAM/MG, luisa.vieira@meioambiente.mg.gov.br
[5]Analista Ambiental, IGAM/MG, sergio.costa@meioambiente.mg.gov.br
6 Analista Ambiental, IGAM/MG, vanessa.saraiva@meioambiente.mg.gov.br

1- INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos constitui um dos desafios mais prementes para o desenvolvimento sustentável, especialmente em regiões com pressões hídricas crescentes e vulnerabilidades ambientais acentuadas. No Brasil, a Lei nº 9.433/1997 estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituindo a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e gestão, e reconhecendo a água como bem de domínio público e recurso natural limitado (Brasil, 1997). Neste contexto, Minas Gerais apresenta-se como um estado estratégico, abrigando nascentes de importantes bacias hidrográficas nacionais e enfrentando desafios significativos relacionados à qualidade e disponibilidade de água para múltiplos usos.

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), como órgão gestor estadual, é responsável pela implementação de políticas de gestão de recursos hídricos e pelo monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas de Minas Gerais. Historicamente, o monitoramento ambiental em Minas Gerais era caracterizado por processos manuais e fluxos de informação descentralizados. Estes gargalos resultavam em atrasos significativos na consistência de dados e disponibilização de informações, dificultava a identificação de tendências espaciais e temporais, e comprometia a capacidade de resposta rápida a situações críticas de qualidade da água.

Segundo Pinheiro *et al*. (2024), os sistemas de apoio à decisão (SAD) representam ferramentas estratégicas para integrar dados de múltiplas fontes e facilitar análises complexas em contextos de gestão de recursos hídricos. A adoção dessas plataformas de informação permite superar a fragmentação histórica de informações e o isolamento fontes de monitoramento, garantindo agilidade no processamento, transparência e confiabilidade estatística, especialmente em cenários de eventos críticos que exigem respostas institucionais céleres necessárias à segurança hídrica.

Como resposta a esses desafios, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas desenvolveu o Sistema Integrado de Gestão do Monitoramento das Águas (SIGMA), uma plataforma de informação que centraliza dados de monitoramento da qualidade e quantidade das águas provenientes de múltiplas fontes. O sistema automatiza processos de validação e tratamento de dados, além de armazenar séries históricas estruturadas, superando gargalos históricos de fluxos de informação descentralizados.

Assim, este artigo apresenta e analisa o Sistema Integrado de Gestão do Monitoramento das Águas (SIGMA) como ferramenta estratégica de centralização, validação e análise de dados de qualidade da água, demonstrando seu impacto na eficiência operacional e na tomada de decisão no âmbito da gestão de recursos hídricos em Minas Gerais.

2- METODOLOGIA DO SIGMA/IGAM

O Sistema Integrado de Gestão do Monitoramento Ambiental (SIGMA) foi desenvolvido pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) como uma plataforma de informação que centraliza dados de monitoramento da qualidade e quantidade das águas provenientes de múltiplas fontes. O SIGMA automatiza processos de validação e tratamento de dados, armazena séries históricas estruturadas, calcula indicadores de qualidade (como o Índice de Qualidade da Água — IQA — e Índice de Estado Trófico - IET), e gera produtos analíticos (tabelas, gráficos, relatórios) que apoiam a tomada de decisão em tempo hábil.

2.1 - Arquitetura e Fluxo dos Dados

O SIGMA adota uma arquitetura modular e integrada, composta por módulos de entrada, processamento, validação, armazenamento e visualização, conforme ilustrado na Figura 1. Em consonância com o modelo proposto por Pinheiro *et al*. (2024), e corroborado por Rodrigues *et al*. (2025) o sistema atua como um SAD (Sistema de Apoio à Decisão) que converte dados ambientais brutos em inteligência estruturada para a segurança hídrica.

A entrada de dados ocorre por meio de arquivos eletrônicos padronizados inseridos diretamente pelos laboratórios e via aplicativo mobile por observadores hídricos e técnicos de campo, eliminando registros manuais e minimizando os riscos de inconsistências. Na sequência, o sistema executa um módulo de validação automática que contempla verificações estruturais e análises preliminares síncronas, atuando como mecanismo de garantia e controle de qualidade (QA/QC). Após o processamento, os registros são consolidados em um banco de dados unificado, que integra variáveis quantitativas (vazão e precipitação) e qualitativas, permitindo uma avaliação sistêmica das condições hídricas do estado.

Por fim, os dados processados e aprovados alimentam uma camada de visualização composta por painéis interativos (dashboards), relatórios técnicos e ferramentas de cálculo automatizado de indicadores estratégicos

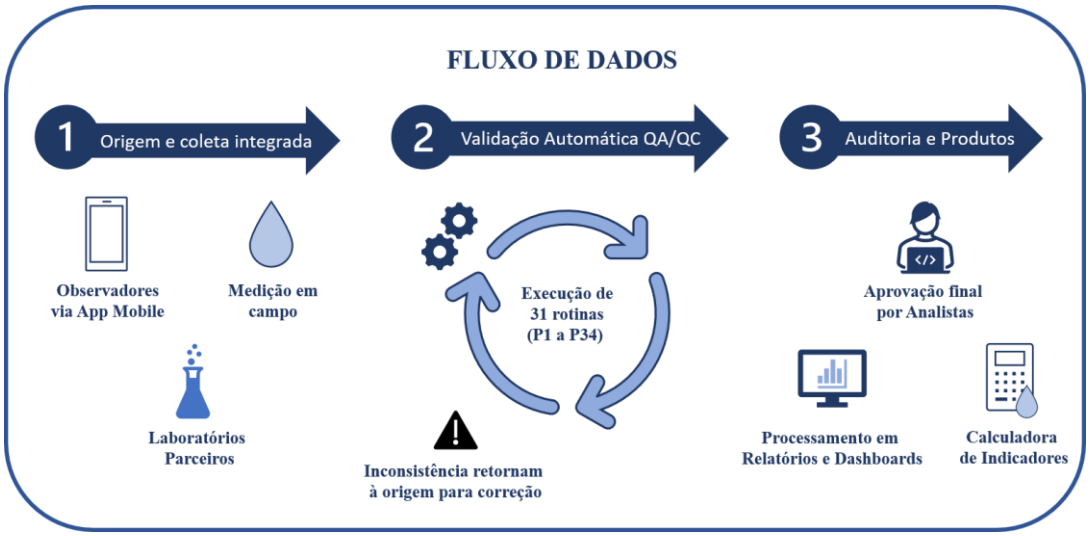


Figura 1 - Fluxo operacional de processamento e governança de dados no ambiente SIGMA.
Fonte: IGAM (2026)

2.2 - Fontes de Dados e Abrangência

O sistema gerencia o acervo histórico e atual do monitoramento em Minas Gerais, com destaque para o Programa Águas de Minas, que hoje abrange 713 pontos ativos de monitoramento de água superficial e 122 pontos de águas subterrâneas, incluindo poços e nascentes. Além da rede convencional, o SIGMA integra dados de sedimentos, além de ensaios ecotoxicológicos essenciais para avaliar a toxicidade aguda e crônica em ecossistemas aquáticos.

A estrutura da plataforma permite a gestão de coletas emergenciais, decorrentes de eventos críticos, como o monitoramento estratégico realizado na bacia do Rio Paraopeba após o rompimento da barragem de Brumadinho, Minas Gerais (Minas Gerais, 2024). A distribuição espacial da rede de qualidade superficial e subterrânea monitorada é apresentada na Figura 2.

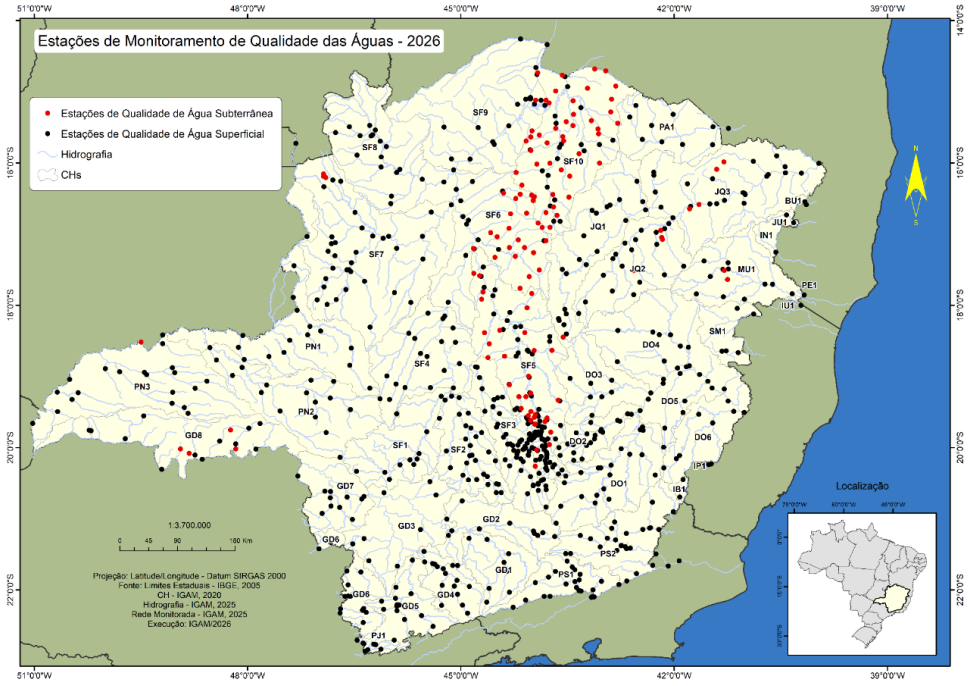


Figura 2 - Distribuição espacial da rede de monitoramento superficial e subterrânea em Minas Gerais. Fonte: IGAM (2026).

2.3 - Protocolos de Garantia e Controle de Qualidade (QA/QC)

A confiabilidade dos dados no SIGMA é assegurada por meio de protocolos de Garantia e Controle de Qualidade (QA/QC) estruturados em uma hierarquia de validação em diferentes níveis de consistência.

No Nível N0 (Validação Estrutural), são aplicadas rotinas automatizadas (P1 a P34) que verificam a integridade cadastral das informações, como o preenchimento de campos obrigatórios e padronização de nomenclaturas. No Nível N1 (Validação Analítica), o sistema executa verificações de consistência físico-química entre parâmetros (ex: DQO ≥ DBO) e validações estatísticas das séries históricas, utilizando métricas estatísticas para a identificação de valores discrepantes (outliers). O Nível N2 (Controle de Amostras) avalia a conformidade de brancos e duplicatas analíticas. Todo o processo de governança exige que os laboratórios fornecedores sejam acreditados pela norma ISO/IEC 17025, o que garante o rigor dos ensaios analíticos. A dinâmica entre esses níveis e a estrutura hierárquica que fundamenta a validação dos dados no sistema são detalhadas na Figura 3.

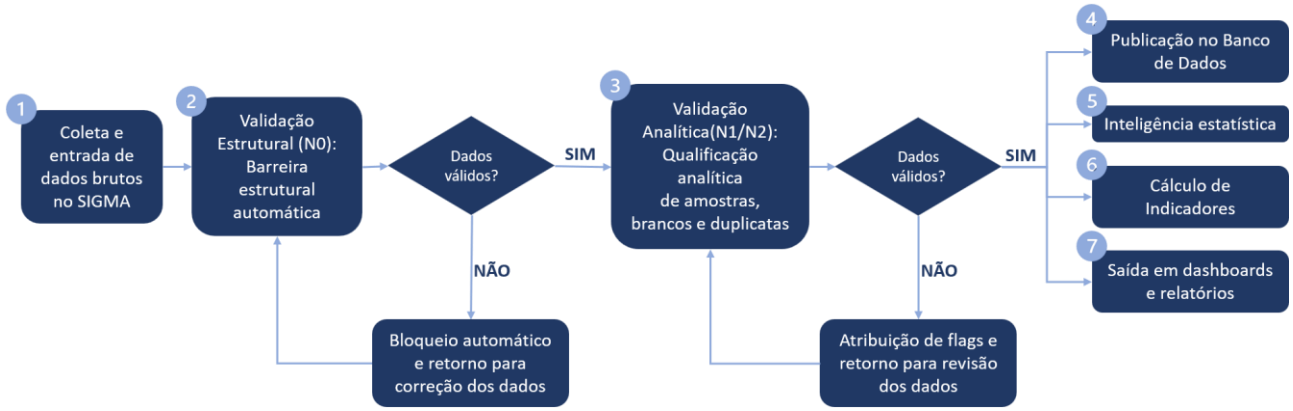


Figura 3- Estrutura hierárquica de validação e qualificação de dados (QA/QC) no ambiente SIGMA.
Fonte: IGAM (2026)

2.4 - Ferramentas de Inteligência e Difusão

A camada de saída do SIGMA é composta por ferramentas de Business Intelligence (BI) que sistematizam os dados validados em interfaces gráficas e georreferenciadas. A plataforma opera por meio de dashboards que integram variáveis de qualidade da água, vazão e precipitação, permitindo o cruzamento de indicadores estratégicos em diferentes escalas temporais e espaciais. A Figura 4 ilustra algumas das interfaces de saída do sistema, abrangendo desde a distribuição espacial de estações até o acompanhamento histórico de indicadores estratégicos.

A arquitetura inclui a integração com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o mapeamento da conformidade ambiental em relação aos padrões estabelecidos pelas normativas vigentes. Para a difusão das informações, o sistema alimenta o Portal Infohidro e repositórios institucionais, disponibilizando relatórios automatizados, séries históricas e dados brutos para acesso público (Disponível em: https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/).

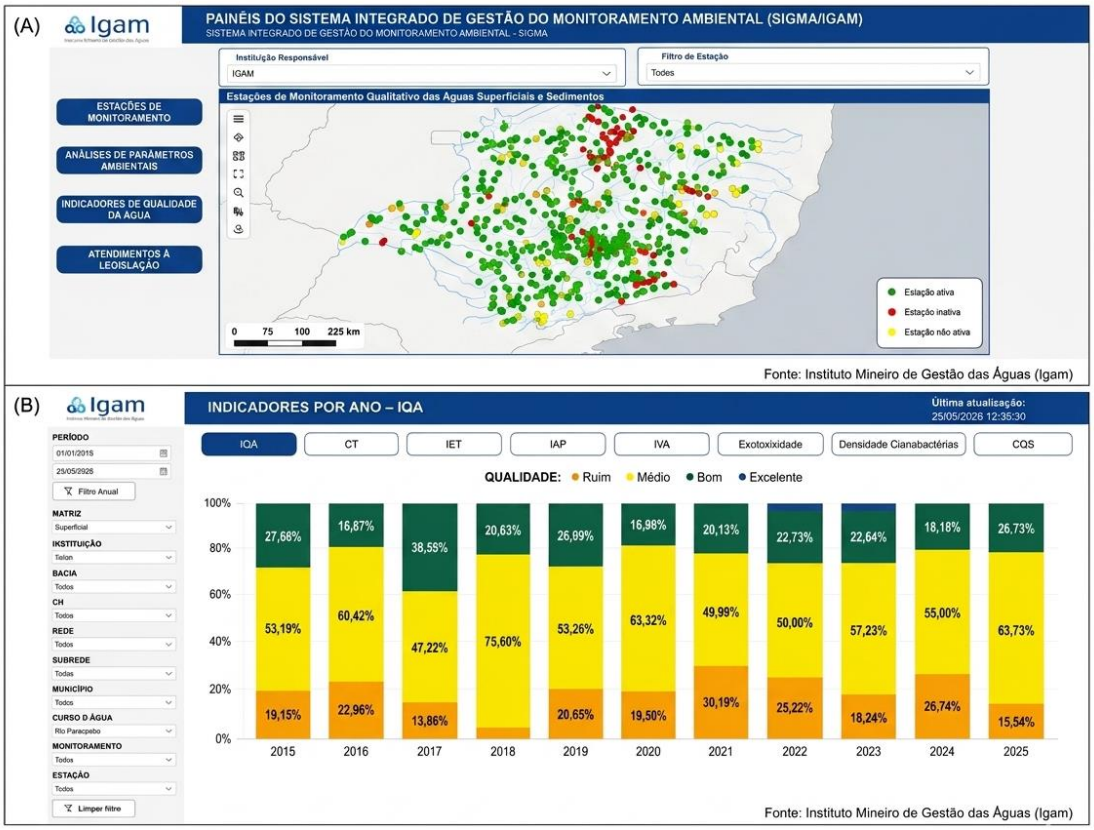


Figura 4- Exemplos de interfaces analíticas e painéis de visualização (*dashboards*) do SIGMA/IGAM. Fonte: SIGMA/IGAM (2026)

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO: IMPACTOS DA TRANSIÇÃO PARA O SIGMA

A transição do modelo de gestão manual e fragmentada do monitoramento para o paradigma SIGMA possibilitou a unificação das matrizes de monitoramento (superficial, subterrânea e sedimentos) em uma plataforma integrada, eliminando gargalos históricos de processamento. Os ganhos operacionais e indicadores de desempenho resultantes dessa implementação estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo de ganhos operacionais entre o modelo tradicional versus o SIGMA

Indicador de Desempenho	Modelo Tradicional (Histórico)	Paradigma SIGMA (Atual)	Impacto Institucional
Entrada de Dados	Manual e fragmentada.	Inserção direta via laboratório e aplicativo mobile.	Eliminação de erros de transcrição e digitação.
Governança de Dados	Conferências manuais e fragmentadas.	Fluxo automatizado com validadores e atribuição síncrona de flags.	Rastreabilidade total e eliminação de gargalos históricos.
Tempo de Resposta	45 dias para consistência manual.	5 dias via rotinas automatizadas.	Ganho de 89% na celeridade e emissão ágil de alertas.
Planejamento Operacional	Planos estáticos e desarticulados.	Planos digitais integrados com validação automática.	Agilidade operacional em ajustes e controle de versões.
Governança Contratual	Controle físico e fragmentado.	Ciclo integrado de execução e fluxos auditáveis.	Maior segurança técnica e jurídica institucional.
Integração Operacional	Bases de qualidade e hidrometria isoladas.	Sinergia Quali-Quanti (Vazão + Qualidade).	Cálculo automatizado de cargas poluentes.
Suporte à Decisão	Relatórios estáticos e fragmentados.	Dashboards integrados com padrões e tendências.	Decisão fundamentada em dados consistidos e auditáveis.

Fonte: SIGMA/IGAM (2026), elaborado pelos autores

3.1 - Agilidade e Tempestividade do Dado

O impacto mais expressivo na gestão institucional reside na redução processamento do dado. Enquanto a revisão de consistência manual demandava uma média histórica de 45 dias, a execução síncrona das rotinas automatizadas permitiu otimizar esse prazo para 5 dias. Esse ganho de 89% na celeridade é um divisor de águas para a segurança hídrica, proporciona ao IGAM maior rapidez na emissão de alertas e boletins técnicos, aspecto essencial para a proteção dos corpos hídricos e da população.

3.2 - Integração Quali-Quanti e Monitoramento de Cargas

A integração operacional entre dados de qualidade da água e informações hidrométricas (vazão e precipitação) possibilitou a execução de rotinas automatizadas para o cálculo de cargas poluentes. Anteriormente, essas bases eram analisadas separadamente, o que limitava a realização de avaliações sistêmicas. Com o novo sistema, passarão a ser executadas rotinas automatizadas capazes de calcular cargas poluentes de forma integrada, promovendo uma articulação técnica entre diferentes áreas.

3.3 - Inteligência Analítica e Gestão de Eventos Críticos

A maturidade do sistema foi testada em cenários de urgência ambiental, como o monitoramento estratégico da bacia do Rio Paraopeba. A capacidade de consolidar dados de múltiplos pontos e realizar análises rápidas de tendências transformou o registro bruto em inteligência organizacional. Além disso, a calculadora automatizada de indicadores (IQA, CT e IET) minimiza a ocorrência de falhas humanas, além de assegurar maior uniformidade e confiabilidade nos resultados obtidos.

3.4 - Transparência Pública e Controle Social e Governança Contratual

O SIGMA também inova ao integrar a fiscalização e a auditoria de contratos laboratoriais em fluxos auditáveis, o que confere maior segurança técnica e reforça a conformidade institucional com os princípios da administração pública. Além da eficiência interna, o sistema democratiza a informação hídrica por meio de interfaces simplificadas no Portal Infohidro. Essa transparência favorece a capacitação dos Comitês de Bacias, permitindo que usuários e organizações da sociedade civil acompanhem os indicadores de qualidade, fortalecendo o controle social sobre a eficácia das políticas ambientais vigentes.

4- CONCLUSÕES

A implementação do SIGMA consolidou a gestão integrada do monitoramento das águas em Minas Gerais ao unificar o planejamento, a execução e a fiscalização de contratos laboratoriais em um ambiente digital único. O sistema representa uma resposta técnica e institucional robusta aos desafios históricos de fragmentação e desarticulação de dados, estabelecendo fluxos auditáveis que elevam o patamar de segurança técnica e jurídica da autarquia, além de promover a integração operacional entre os monitoramentos de águas superficiais, subterrâneas e sedimentos.

A transição para o novo sistema SIGMA evidenciou saltos expressivos de eficiência, com destaque para a redução do tempo de consistência dos dados em 89% (de 45 para 5 dias). Esse acesso célere à informação, aliado à automação do cálculo de indicadores e da integração quali-quanti para monitoramento de cargas, transforma registros brutos em inteligência organizacional. Tais avanços permitem um monitoramento mais sistemático de rios, reservatórios e aquíferos, possibilitando respostas ágeis a eventos de contaminação e o acompanhamento de parâmetros sensíveis.

A experiência exitosa em Minas Gerais estabelece o sistema como uma referência para a gestão hídrica nacional. A estruturação de bancos de dados unificados e interoperáveis entre órgãos gestores estaduais, ampliaria a capacidade analítica do setor no Brasil, permitindo a comparação entre bacias hidrográficas e o reconhecimento de padrões regionais indispensáveis ao planejamento estratégico do setor.

Além dos ganhos técnicos, o sistema fortalece a transparência e o controle social ao disponibilizar informações de maneira simplificada através de interfaces públicas, como o Portal Infohidro. Essa democratização do dado favorece a capacitação de Comitês de Bacias e o acompanhamento por organizações da sociedade civil, legitimando a eficácia das políticas ambientais. Por fim, recomenda-se a continuidade da modernização do sistema por meio da expansão

de módulos de Inteligência Artificial e a integração com sensores em tempo real, assegurando que o monitoramento permaneça na vanguarda tecnológica para a preservação dos recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) pelo suporte técnico e disponibilização da base de dados, e aos técnicos de campo e laboratório que viabilizam a coleta contínua de informações que alimentam o SIGMA.

REFERÊNCIAS

BRASIL (1997). *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1990. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (2026). *Portal Infohidro: Monitoramento da Qualidade das Águas*. Disponível em: https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/. Acesso em: 03 de junho de 2026.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (2025). *Relatório de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais em Minas Gerais*. Belo Horizonte: IGAM, 2025.

MINAS GERAIS (1999). *Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999*. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Belo Horizonte, 1999.

MINAS GERAIS (2024). Governo do Estado. *Histórico do rompimento das barragens da Vale na mina Córrego do Feijão*. Belo Horizonte, 2024. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>. Acesso em: 3 jun. 2026.

PINHEIRO, M.C.V; FALSARELLA, O.M.; MARIOSA, P.H.; CONTI, D. de M.; MARIOSA, D. F. (2024). "*Sistemas de apoio à decisão e gestão de recursos hídricos: proposta de um modelo conceitual"*. Perspectivas em Ciência da Informação, Belo Horizonte, v. 29, Fluxo Contínuo, p. e-42254, 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1981-5344/42254. Acesso em: 21 maio 2026.

RODRIGUES, M.B.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F. (2025). "*A decision support system for aiding watercourses classification processes*". Environmental Science and Policy, V. 163, art. 103965, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103965. Acesso em: 26 maio 2026.