AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DE INDICADORES AMBIENTAIS PARA O DIAGNÓSTICO DE FALÊNCIA HÍDRICA: ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (SP, BRASIL)

Vitória de Almeida Vergara Hidalgo [1] & Rodrigo Lilla Manzione [2]

RESUMO – Em 2026, a Organização das Nações Unidas reconheceu o início da era da falência hídrica global, alertando que os recursos hídricos são explorados além de seus limites hidrológicos e que a Agenda Global da Água precisa ser readequada às condições do Antropoceno. O diagnóstico da falência hídrica é fundamental para identificar perdas sistêmicas e danos irreversíveis aos sistemas hídricos. Apesar da crescente relevância do tema, poucos estudos são direcionados ao diagnóstico de falência hídrica, sobretudo, em escala de bacia hidrográfica, evidenciando uma lacuna na gestão dos recursos hídricos. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a adequação dos indicadores utilizados na gestão para o diagnóstico deste cenário, tomando como estudo de caso a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Como resultado, o estudo demonstra que os indicadores inclusos nas rotinas de monitoramento são consistentes para a avaliação da disponibilidade e demanda hídrica, qualidade da água e variações climáticas. Todavia, foram identificadas lacunas quanto o monitoramento das funções ecossistêmicas e marcadores de irreversibilidade, evidenciando a necessidade do aprimoramento desses indicadores para o diagnóstico de falência hídrica. Por fim, é possível inferir que a avaliação dos sistemas hídricos é realizada de forma fragmentada, dificultando uma análise integrada e sistêmica de cenários críticos.

ABSTRACT– In 2026, the United Nations recognized the beginning of the global water bankruptcy era, warning that water resources are being exploited beyond their hydrological limits and that the Global Water Agenda must be adapted to the conditions of the Anthropocene. Diagnosing water bankruptcy is essential to identify systemic losses of ecological functions and irreversible damage to water systems. Despite the growing relevance of the topic, studies addressing water bankruptcy, particularly at the river basin scale, remain scarce, revealing an important gap in both the scientific literature and water resources management. Therefore, this study aimed to evaluate the adequacy of the indicators currently used in water management for diagnosing water bankruptcy, using the Alto Tietê River Basin (São Paulo, Brazil) as a case study. The results show that the indicators currently employed in monitoring programs adequately represent aspects related to water availability, water quality, and climate variability. However, their fragmented application hinders an integrated assessment of the water system. Furthermore, gaps were identified in the monitoring of biodiversity, ecosystem functions, and irreversible damage, highlighting the need to improve existing indicator systems to support the diagnosis and monitoring of water bankruptcy.

Palavras-Chave – Falência Hídrica; Gestão dos Recursos Hídricos; Bacia Hidrográfica

[1]) Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita" (UNESP), Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira - SP, 15385-000, (11) 98026-4353, v.hidalgo@unesp.br
[2]) Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita" (UNESP), Av. Renato da Costa Lima, 451 - Ville de France, Ourinhos - SP, 19903-302, (14) 99781-1800, lilla.manzione@unesp.br

1. INTRODUÇÃO

O conceito de falência hídrica em sistemas homem-água, formalmente descrito por Madani (2026), refere-se ao diagnóstico de uma falha sistêmica, caracterizada por um estado persistente de pós-crise, no qual captações intensas e prolongadas de águas superficiais e subterrâneas excedem as recargas naturais e os limites seguros de explotação, provocando impactos irreversíveis à natureza.

A falência hídrica não é tratada como um episódio de escassez severa com um período definido, mas como uma alteração estrutural e duradoura dos sistemas hídricos. Conforme definido por Madani (2026), o conceito não está relacionado somente à quantidade de água disponível, mas, sobretudo, à forma como essa água é gerida e alocada.

O estado de falência hídrica está fundamentado nas condições de insolvência e irreversibilidade dos sistemas. A insolvência ocorre quando as demandas pelo uso da água superam a capacidade de suporte hidrológica e, a irreversibilidade está associada aos danos irreversíveis à natureza em escala de tempo humana, mesmo quando mobilizados elevados custos econômicos, sociais e ambientais (Madani (2026)).

Estudos recentes apontam que diversos sistemas homem-água operam em condição de falência hídrica (Degefu (2016); Madani *et al*. (2016); Parivar *et al.*(2023); Madani (2026b)). As consequências deste cenário são perceptíveis em diferentes continentes, incluindo a seca de rios perenes, o desaparecimento de áreas úmidas, a expansão da desertificação, o rebaixamento persistente de aquíferos, a subsidência de solos e cidades submetidas a cenários recorrentes de escassez (Madani (2026b)).

Nesse contexto, em 2026, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou que o mundo entrou na era da falência hídrica global, reconhecendo que os recursos hídricos são explorados além de seus limites hidrológicos e que a agenda global da água precisa ser repensada e readequada às condições do Antropoceno (Madani (2026b)).

Conforme descrito por Madani (2026), a gestão da falência hídrica parte do reconhecimento de um estado prolongado de pós-crise, implicando a revisão estrutural do modelo de gestão, a partir da reavaliação de prioridades e metas, dos arranjos institucionais, mecanismos de alocação e instrumentos de regulação.

Portanto, o diagnóstico de falência hídrica se torna essencial para a governança da água. Reconhecer o fracasso sistêmico e a irreversibilidade de determinados cenários transforma a adoção de medidas adaptativas em uma necessidade estratégica de gestão.

Uma vez que água é considerada um dos temas centrais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os estudos diagnósticos de falência hídrica estão relacionados diretamente com: o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao promover a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos; o ODS 1 (Erradicação da Pobreza) e o ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ao reconhecer que a segurança hídrica é condição fundamental para a redução de vulnerabilidades socioeconômicas; o ODS 13 (Ação Climática), ao incentivar a adoção de estratégias de adaptação e; o ODS 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes), ao reforçar a necessidade de instituições responsáveis, transparentes e capazes de mediar conflitos (ONU (2015)).

Entretanto, poucos estudos são direcionados ao diagnóstico de falência, sobretudo, em escala de bacia hidrográfica, evidenciando uma lacuna na literatura moderna e nos modelos de gestão hídrica. As bacias hidrográficas, constituída pela Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL (1997)) como unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, são importantes sistemas para os estudos diagnóstico de falência hídrico e, consequentemente, para avaliação dos modelos de gestão frente a cenários críticos.

Neste contexto, a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT), sendo uma das mais importantes em termos econômicos do país, apresenta características que se assemelham a um estado de falência hídrica, tais como eventos prolongados de seca, elevada demanda pelo uso da água e intensa poluição dos recursos hídricos (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (2019)).

Localizada em região de cabeceiras, a disponibilidade hídrica da bacia é naturalmente reduzida (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (2019)). A elevada demanda urbana e industrial, associada à limitada disponibilidade hídrica, evidencia um descompasso entre oferta e demanda, elemento central do conceito de insolvência hidrológica.

Diante deste panorama, o objetivo deste estudo é aplicar o conceito de falência hídrica para o diagnóstico da BHAT, visando a análise da adequação dos indicadores utilizados na gestão dos recursos hídricos da bacia para o acompanhamento de cenários de escassez, bem como a identificação de lacunas nos modelos de monitoramento ambiental.

2. MATERIAS E MÉTODOS

A avaliação da adequação dos indicadores utilizados na gestão dos recursos hídricos da BHAT foi baseada no conceito de falência hídrica proposto por Madani (2026) e nas diretrizes apresentadas pela Organização das Nações Unidas.

Para o estudo, foi realizada uma análise sistêmica dos indicadores utilizados na gestão dos recursos hídricos da BHAT, adotando como critério que o conjunto de indicadores deve permitir a avaliação: (i) dos estoques do capital natural relacionado à água e de suas tendências de longo prazo; (ii) da relação entre as demandas hídricas e a capacidade de suporte do sistema; (iii) da condição dos ecossistemas, de sua integridade e da manutenção das funções ecológicas; (iv) dos marcadores de irreversibilidade, capazes de identificar perdas permanentes ou de difícil reversão; e (v) da governança e da capacidade institucional em resposta a eventos extremos.

Os indicadores estudados foram extraídos das redes de monitoramento e relatórios técnicos utilizados na gestão dos recursos hídricos da BHAT, gerenciadas pelos órgãos integrantes do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH).

Assim, foram analisados os dados produzidos e gerenciados pela Agência de Águas do Estado de São Paulo (SP-Águas), a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL), Secretaria da Fazenda e Planejamento do Estado de São Paulo, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), a Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (FABHAT) e o Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (CBH-AT).

Adicionalmente, foram incorporadas informações provenientes de instituições de abrangência estadual e nacional, incluindo: a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH); o Ministério das Cidades, por meio o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA); o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); a Fundação SOS Mata Atlântica, a plataforma MapBiomas e o Sistema Ambiental Paulista DataGeo.

Para cada indicador identificado foram avaliados seu objetivo analítico, escala espacial de monitoramento, periodicidade de atualização, disponibilidade de séries históricas e o potencial de integração com outras bases de dados. Por fim, os indicadores foram classificados em baixa, moderada ou alta capacidade de subsidiar estudos de diagnóstico da falência hídrica.

Após a análise de adequação dos indicadores, estes foram organizados em 5 dimensões temáticas, nomeadas em: Dimensão A - Pressão antropológica e mudanças climáticas, Dimensão B - Reservas naturais e renováveis de água, Dimensão C - Manutenção das funções ecológicas, Dimensão D - Marcadores de danos irreversíveis e Dimensão E - Governança e capacidade institucional, visando identificar potencialidades, limitações e lacunas dos sistemas de monitoramento atualmente empregados na BHAT para o diagnóstico de falência hídrica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta as principais redes de monitoramento utilizadas na gestão dos recursos hídricos da BHAT.

Tabela 1 – Redes de monitoramento utilizadas na gestão dos recursos hídricos da BHAT

Rede de Monitoramento	Dimensão	Órgão Gestor	Consistência e série histórica	Adequação para o diagnóstico de Falência Hídrica
Rede Hidrológica Básica de SP	A e B	SP-Águas	Dados consistentes e séries históricas contínuas desde a década de 1950	Alta
Sistema HidroApp	A, B e C	SP-Águas	Dados consistentes e séries históricas contínuas	Média: Alguns dados com séries históricas de 1 ano
SSD – Sistemas Produtores	A, B e C	SP-Águas e SABESP	Dados consistentes e séries históricas contínuas	Alta: Monitoramento dos estoques e tendências dos reservatórios
Rede de Monitoramento da Qualidade de Água	A, B e C	CETESB	Dados consistentes e séries históricas contínuas	Alta: Análise da qualidade da água, dos componentes dos recursos hídricos e preservação da vida aquática e bentônica
Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA)	A e E	Ministério das Cidades	Dados consistentes e séries históricas contínuas	Média: Algumas inconsistências nas séries históricas dos dados
SEADE	A e E	Secretaria da Fazenda e Planejamento,	Dados consistentes e séries históricas contínuas	Média: Algumas inconsistência nas séries histórica dos dados

Nota: Dimensão A - Pressão antropológica e mudanças climáticas, Dimensão B - Reservas naturais e renováveis de água, Dimensão C - Manutenção das funções ecológicas, Dimensão D - Marcadores de danos irreversíveis e Dimensão E - Governança e capacidade institucional

Os resultados demonstram que a maior parte dos indicadores utilizados na gestão da BHAT estão concentrados nas dimensões relacionadas à pressão antropológica sobre os recursos hídricos, reservas naturais e renováveis de água, qualidade da água e governança, enquanto aspectos associados

à biodiversidade, funções ecossistêmicas e impactos irreversíveis apresentam menor representatividade.

Os indicadores referentes a disponibilidade e demanda hídrica permitem a identificação de situações de escassez, o acompanhamento das variações do capital natural de água e as demandas por recursos hídricos. Entretanto, foi possível verificar que as análises estão baseadas em fluxos anuais e condições hidrológicas, havendo poucas análises e discussões quanto as alterações nos estoques naturais de água e a superação da capacidade de suporte ao longo do tempo.

Ainda, a partir da análise da Rede Hidrológica Básica do Estado de São Paulo, foi possível identificar a ausência de pontos piezométricos monitorados pela SP-Águas na BHAT, demonstrando uma lacuna no acompanhamento do nível dos lençóis freáticos e de superexploração dos aquíferos.

A BHAT dispõe de uma ampla rede de monitoramento da qualidade das águas, com pontos distribuídos em toda a extensão da bacia, gerenciados pela CETESB. Ainda, para o monitoramento da condição dos componentes dos recursos hídricos, a bacia dispõe de redes de monitoramento da cobertura vegetal, áreas protegidas, áreas contaminadas, proteção dos mananciais, uso e ocupação do solo. Todavia, foi identificado poucos dados relacionados à manutenção de funções ecológicas como manutenção da biota edáfica, capacidade de produção de alimentos e dessedentação animal.

Embora sejam disponíveis muitos dados relacionados a análise da qualidade e condição dos componentes dos recursos hídricos, na maioria das vezes, estes são analisados pontualmente e fragmentados, não havendo uma discussão sistêmica quanto a condição geral da bacia. No Relatório de Situação da BHAT, elaborado pela FABHAT, é realizada a análise sistêmica da qualidade da água na BHAT, todavia, não há um aprofundamento na análise quanto as causas de mudanças positivas ou negativas na qualidade dos recursos hídricos.

Quanto ao monitoramento da resiliência do sistema hídrico, são inclusos poucos indicadores direcionados para o acompanhamento do tempo de recuperação do sistema após eventos extremos, a dependência por infraestruturas artificiais, a capacidade de autodepuração dos rios, entre outros. Essa limitação dificulta a avaliação da capacidade do sistema em manter suas funções ecológicas diante do aumento das pressões antrópicas.

A dimensão de marcadores de irreversibilidade foi a menos contemplada pelos sistemas de monitoramento atualmente empregados na BHAT. Embora os órgãos ambientais, tais como a CETESB, realizem a análise dos impactos e gestão de risco ambiental, foram identificadas lacunas significativas quanto ao monitoramento da compactação de aquíferos, perda de biodiversidade, subsidência do solo e perda de áreas úmidas.

A ausência de indicadores específicos para o monitoramento de danos significativos e/ou irreversíveis dificulta a identificação de mudanças de estado do sistema hídrico e a avaliação de perdas que possam comprometer permanentemente a capacidade de recuperação dos ecossistemas, bem como impossibilitar o diagnóstico de falência hídrica, baseado no conceito da irreversibilidade.

Quanto a governança e a capacidade institucional, foram identificados indicadores relacionados à implementação dos instrumentos de gestão, investimentos em saneamento, enquadramento dos corpos hídricos, monitoramento hidrológico e investimentos em projetos de proteção e recuperação dos recursos hídricos. Esses indicadores demonstram a capacidade institucional para acompanhamento da gestão dos recursos hídricos.

Todavia, conforme mencionado anteriormente, foi possível identificar que os indicadores de governança são avaliados de forma isolada, com pouco integração com informações hidrológicas, ecológicas e sociais. Dessa forma, embora permitam acompanhar ações de gestão, apresentam limitações para avaliar a efetividade das respostas institucionais frente a eventos extremos.

4. CONCLUSÃO

A partir do estudo, foi possível verificar que a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT) dispõe de um conjunto robusto de indicadores voltados ao monitoramento da demanda, da disponibilidade hídrica e da qualidade da água. Contudo, foram identificadas lacunas relevantes para a avaliação de aspectos fundamentais associados ao diagnóstico da falência hídrica, especialmente no que se refere à capacidade de suporte do sistema hídrico, à manutenção das funções ecológicas, ao estado de conservação dos componentes ambientais relacionados aos recursos hídricos, à identificação de danos irreversíveis e à capacidade institucional para responder a cenários de escassez severa.

Embora a estrutura de monitoramento atualmente adotada produza informações consistentes e disponha de séries históricas representativas, sua abordagem permanece predominantemente setorial e fragmentada. Dessa forma, a compreensão das interações e retroalimentações entre as dimensões hidrológica, ambiental, climática, social e institucional ainda se mostra limitada, dificultando a avaliação integrada da sustentabilidade do sistema hídrico.

Nesse contexto, pode-se inferir que os indicadores atualmente utilizados na gestão dos recursos hídricos da BHAT são adequados para o monitoramento convencional das condições de oferta, demanda e qualidade da água. Entretanto, sua capacidade de subsidiar um diagnóstico sistêmico da falência hídrica é restrita, exigindo o aprofundamento das análises relacionadas à superação da capacidade de suporte hídrico da bacia, à degradação progressiva das funções ecológicas, à ocorrência

de alterações irreversíveis nos sistemas naturais e à capacidade de adaptação e resposta das instituições gestoras frente a eventos críticos.

Adicionalmente, estudos voltados à avaliação da falência hídrica demandam a integração e compatibilização de bases de dados, atualmente dispersas, bem como a adoção de abordagens sistêmicas capazes de compreender as interdependências entre os diferentes componentes do sistema hídrico e suas múltiplas escalas de interação.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (FABHAT), da Fundação Ezute, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº 951420/2023. Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

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 e dá outras providências*. Diário Oficial da União: Brasília, DF.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (CBH-AT) (2019). *Plano de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: resumo executivo*. São Paulo: CBH-AT.

DEGEFU, D. M.; HE, W. (2016). *Water bankruptcy in the mighty Nile river basin*. Sustainable Water Resources Management, v. 2, n. 1, p. 29–37.

MADANI, K.; AGHAKOUCHAK, A.; MIRCHI, A. (2016). *Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation*. Iranian Studies, v. 49, n. 6, p. 997–1016.

MADANI, K. (2026). *Water bankruptcy: the formal definition*. Water Resources Management, Dordrecht, v. 40, art. 78.

MADANI, K. (2026b). *Global water bankruptcy: living beyond our hydrological means in the post-crisis era*. Ontario, Canada: United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH).

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) (2015). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Nova York: ONU.

PARIVAR, P.; SAADATMAND, M.; DEHGHAN MANSHADI, Z.; MOROVATI SHARIFABADI, A.; MALEKINEZHAD, H. (2023). *Evaluation of the effect of unsustainable urban development on*

water bankruptcy in arid regions using the system dynamics method: case of Yazd, Iran. Sustainable Water Resources Management, v. 9, n. 5, p. 166.