

**AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPREGADAS NA DETECÇÃO DE COMPOSTOS EMERGENTES NA
BACIA DO ALTO TIETÊ**Zenilda Garcia Ferreira^{1*}Ricardo Aurélio de Almeida Nunes Gomes^{2*}Prof. Dr. Cristiano Morita Barrado^{3*}

Resumo: Este Trabalho de Conclusão de Curso, orientado pelo Prof. Dr. Cristiano Morita Barrado, apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema "Avaliação das técnicas analíticas empregadas na detecção de compostos emergentes na Bacia do Alto Tietê". A pesquisa analisa contaminantes emergentes, como fármacos, hormônios, produtos de higiene pessoal e pesticidas, que vêm sendo identificados em ambientes aquáticos devido à limitação dos sistemas convencionais de tratamento de esgoto. A principal técnica abordada é a Cromatografia Líquida acoplada à Espectrometria de Massas em Tandem (LC-MS/MS), reconhecida por sua alta sensibilidade e precisão na detecção de substâncias em níveis de traço. Também são discutidas técnicas complementares, como GC-MS, HPLC-DAD e LC-HRMS, além da Extração em Fase Sólida (SPE) e do uso de bioensaios para avaliar efeitos toxicológicos. O estudo reforça a importância da integração de diferentes métodos analíticos no monitoramento de compostos emergentes e destaca a necessidade de aprimorar as tecnologias de tratamento e controle da poluição na Bacia do Alto Tietê, contribuindo para a proteção da qualidade da água e da saúde pública.

Palavras-chave: Contaminantes Emergentes; Bacia do Alto Tietê; LC-MS/MS; Qualidade da Água.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural limitado e essencial, possuindo valor econômico, social e ambiental significativo. No entanto, a qualidade global desse recurso tem sofrido um declínio acentuado nas últimas décadas, impulsionada principalmente pelo crescimento populacional e pelo lançamento de esgoto doméstico e industrial não tratado nos corpos hídricos. No Brasil, embora existam leis que regulamentam o

^{1*} Instituto de Química – UFCAT: zenildagarcia52@gmail.com, ragomes23@gmail.com, cristiano@ufcat.edu.br

²

³

tratamento de efluentes, apenas uma parcela da população tem acesso a sistemas de saneamento adequados (RAMALHO, 2025).

Nesse cenário, os Contaminantes de Preocupação Emergente (CpE) tornaram-se um desafio crítico para a saúde pública e o meio ambiente. Esses compostos, que incluem fármacos, hormônios, pesticidas e produtos de higiene pessoal, são detectados em níveis de traço (nanogramas a microgramas por litro) e muitas vezes não são removidos pelos métodos convencionais de tratamento de água e esgoto (RAMALHO, 2025). A Bacia do Alto Tietê (UGRHI 6), que abriga a Região Metropolitana de São Paulo e mais de 20 milhões de habitantes, é uma das áreas mais afetadas por essa problemática devido à sua alta densidade populacional e intensa atividade industrial (BRANCO, et al. 2021).

A crescente urbanização e o desenvolvimento industrial têm impulsionado a presença de contaminantes emergentes (CEs) nos corpos d'água, representando um dos maiores desafios contemporâneos para a saúde pública e a gestão ambiental. Substâncias como fármacos, hormônios e pesticidas são frequentemente detectadas em matrizes aquáticas, uma vez que os sistemas convencionais de tratamento de esgoto não possuem eficiência completa para a sua remoção. No contexto brasileiro, a Bacia do Alto Tietê destaca-se como uma região crítica, onde a densidade demográfica intensifica o aporte desses poluentes, cujos impactos podem ser comparados à complexidade química encontrada em lixiviados de aterros sanitários, conhecidos por contaminar solos e águas superficiais (RIGOBELLO et al., 2015).

A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê apresenta um dos quadros mais complexos de saneamento do país, em função da elevada geração de esgotos domésticos e industriais. Estima-se que bilhões de litros de esgoto sejam gerados diariamente na região, sendo que, apesar dos avanços na ampliação da coleta e do tratamento, uma parcela significativa desses efluentes ainda é lançada direta ou indiretamente nos corpos d'água sem tratamento adequado. Essa realidade é mais evidente em áreas periféricas e em cursos d'água de menor porte, que atuam como receptores finais de cargas orgânicas e químicas (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ, 2024).

As principais fontes de contaminação na UGRHI 6 são de origem doméstica, associadas ao lançamento de esgotos sanitários, e de origem industrial, decorrentes de efluentes contendo compostos químicos persistentes. O predomínio dessas fontes resulta na degradação sistemática da qualidade das águas superficiais, com extensos trechos classificados como regulares, ruins ou péssimos, segundo índices oficiais de monitoramento. Estudos recentes indicam que a carga poluidora contínua compromete não apenas os rios principais, como o Tietê e seus afluentes, mas também reservatórios estratégicos para o abastecimento público (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2025).

As consequências dessa poluição são múltiplas e interligadas. Do ponto de vista ambiental, observa-se a redução da biodiversidade aquática, a ocorrência de processos de eutrofização e a alteração do equilíbrio ecológico dos sistemas hídricos. Sob a perspectiva econômica, a degradação da qualidade da água eleva significativamente os custos de tratamento para abastecimento, limita usos múltiplos e impacta atividades produtivas dependentes dos recursos hídricos. Em termos de saúde pública, a exposição crônica a misturas complexas de contaminantes, incluindo compostos emergentes, representa um risco potencial, sobretudo em populações vulneráveis, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e aprimoramento das tecnologias analíticas (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2025; COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ, 2024).

Para viabilizar a detecção desses compostos, o emprego de técnicas analíticas de alta sensibilidade e seletividade é fundamental. O processo inicia-se frequentemente com a Extração em Fase Sólida (SPE) para a concentração e limpeza (clean-up) da amostra. Conforme demonstrado por Barrionuevo e Lanças (2001), a escolha da fase estacionária na SPE, como o Florisil, é determinante para garantir taxas de recuperação robustas (80% a 108%) em matrizes aquosas, permitindo a isolamento eficiente de resíduos.

Após o preparo, a análise segue por técnicas cromatográficas distintas conforme a natureza do analito. Enquanto a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência com Detector de Arranjo de Diodos (HPLC-DAD) e a Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS) oferecem soluções robustas para diversos analitos (RIGOBELLO et al., 2015), é a Cromatografia Líquida acoplada à Espectrometria de Massas em Tandem (LC-MS/MS) que se destaca como o

padrão-ouro para compostos polares e termolábeis (LÓPEZ-FERNÁNDEZ et al., 2020). Adicionalmente, o uso da Cromatografia Líquida de Alta Resolução (LC-HRMS) expande as fronteiras do monitoramento ambiental, permitindo a identificação de compostos desconhecidos por meio da massa exata e a realização de triagens não-alvo (non-target screening) em produtos e matrizes complexas (BARBOSA BARBERO, 2020).

Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre as técnicas analíticas empregadas na detecção de compostos emergentes na Bacia do Alto Tietê. Busca-se, assim, consolidar o conhecimento sobre esses métodos para fornecer subsídios que auxiliem no aprimoramento da gestão sustentável deste ecossistema aquático crítico (RAMALHO, 2025).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Definição e classes de contaminantes emergentes

Os contaminantes emergentes são substâncias que atualmente não estão incluídas nos programas de monitoramento de rotina e podem ser candidatas a regulamentações futuras dependendo de estudos sobre sua toxicidade e persistência (RAMALHO, 2025). As principais classes identificadas no Brasil incluem:

- **Fármacos e Produtos de Cuidado Pessoal (PPCP):** Abrangem analgésicos como paracetamol e ibuprofeno, além de antibióticos e estimulantes como a cafeína (FARTO, et al. 2021). A cafeína é considerada um excelente indicador de poluição por esgoto doméstico em águas superficiais (MONTAGNER, et al. 2019).
- **Hormônios e Desreguladores Endócrinos:** Substâncias naturais e sintéticas, como o 17-alfa-etinilestradiol (EE2) e o Bisfenol A (BPA), que podem interferir no sistema hormonal de humanos e animais, causando efeitos como a feminização de peixes (MONTAGNER, et al. 2019).

- Pesticidas: O uso intensivo de herbicidas como a atrazina e o diuron na agricultura brasileira resulta na contaminação de mananciais por lixiviação e escoamento superficial (RAMALHO, 2025).

2. Técnicas analíticas para detecção de compostos de preocupação emergente (CpE)

a. Preparo de Amostras: Extração em Fase Sólida (SPE)

Antes da análise instrumental, as amostras ambientais necessitam de um preparo adequado, uma vez que os CpEs geralmente estão presentes em concentrações muito baixas, da ordem de nanogramas por litro. A Extração em Fase Sólida (Solid Phase Extraction – SPE) é a técnica de preparo de amostras mais amplamente utilizada para a determinação de micropoluentes em matrizes aquáticas.

A SPE utiliza uma fase estacionária, normalmente acondicionada em cartuchos, para isolar, purificar e concentrar os analitos de interesse a partir de uma matriz líquida. Sua principal função é o clean-up da amostra, removendo interferentes da matriz, além da pré-concentração dos contaminantes, possibilitando a detecção de compostos que não seriam identificáveis por análise direta. Dependendo do protocolo empregado, podem ser alcançados fatores de concentração superiores a 2.000 vezes, o que é essencial para compensar a baixa detectabilidade de determinados CpEs (MONTAGNER et al., 2017).

b. Métodos Cromatográficos e Espectrométricos

i. HPLC-DAD

A Cromatografia Líquida de Alta Eficiência com Detector de Arranjo de Diodos (HPLC-DAD) é uma técnica analítica fundamental que promove a separação dos componentes de uma mistura complexa por meio de uma fase móvel líquida sob alta pressão (HUSSEIN, 2025). O diferencial do detector DAD reside na sua capacidade de realizar a varredura simultânea de diferentes comprimentos de onda na região do UV-Vis, o que permite a identificação precisa de compostos que apresentam cromóforos característicos em sua estrutura molecular.

Embora seja reconhecida como uma técnica robusta e de ampla

aplicabilidade laboratorial, o HPLC-DAD apresenta, em termos gerais, uma menor sensibilidade analítica quando comparado à espectrometria de massas. Por essa razão, o método é frequentemente indicado para análises quantitativas de compostos presentes em concentrações mais elevadas ou como uma ferramenta estratégica e complementar em estudos ambientais, como no monitoramento de poluentes em matrizes de águas superficiais e residuárias (PAUN et al., 2024).

ii. GC-MS

A Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS) é especialmente adequada para a análise de compostos voláteis e semi-voláteis, como pesticidas organoclorados, hidrocarbonetos e alguns ftalatos (RAMALHO, 2025). Nessa técnica, os analitos são separados na fase gasosa e identificados com base em seus padrões de fragmentação iônica, que funcionam como uma “impressão digital” molecular.

Entretanto, muitos CpEs, como hormônios e fármacos, não são naturalmente voláteis ou apresentam baixa estabilidade térmica, exigindo uma etapa prévia de derivatização química para viabilizar sua análise por GC-MS (RAMALHO, 2025).

iii. LC-MS/MS

A Cromatografia Líquida acoplada à Espectrometria de Massas em Tandem (LC-MS/MS) é atualmente considerada uma das ferramentas analíticas mais adequadas para a detecção de CpEs polares e não voláteis. Essa técnica utiliza dois analisadores de massas em série, o que confere elevada seletividade e sensibilidade (RICHARDSON e TERNES, 2020).

No modo de monitoramento de reações múltiplas (MRM), o primeiro analisador seleciona o íon precursor e o segundo analisa os íons fragmentos, reduzindo significativamente os ruídos da matriz. Essa abordagem permite a identificação e quantificação simultânea de centenas de compostos em uma única corrida cromatográfica, com elevada exatidão e limites de detecção extremamente baixos (VASQUES e MORAES, 2024).

iv. LC-HRMS

A Cromatografia Líquida acoplada à Espectrometria de Massas de Alta Resolução (LC-HRMS), utilizando analisadores como Q-TOF ou Orbitrap, representa um avanço significativo nos estudos ambientais (RICHARDSON e TERNES, 2020). Diferentemente do LC-MS/MS convencional, que é direcionado a compostos-alvo previamente conhecidos, o HRMS permite a determinação da massa exata dos íons com alta precisão.

Essa característica possibilita a identificação da fórmula molecular de contaminantes desconhecidos, tornando a técnica essencial para análises não-alvo (*non-target*) e suspeitas (KRAUSS et al., 2010). Dessa forma, o LC-HRMS é amplamente empregado na descoberta de novos CpEs e de subprodutos de degradação formados durante processos ambientais ou de tratamento de água.

3. Contexto da Bacia do Alto Tietê (UGRHI 6)

A Bacia do Alto Tietê enfrenta graves desafios relacionados à poluição hídrica. A região é caracterizada por um intenso uso do solo urbano, onde o reuso indireto de água é uma prática comum: cidades captam água de mananciais que recebem efluentes de outras cidades localizadas a montante. Estudos indicam que reservatórios estratégicos para o abastecimento da região, como o Edgard de Souza, apresentam Atividade Estrogênica (AE) elevada, associada ao lançamento de esgotos (VASQUES & MORAES, 2024).

MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa configura-se como uma revisão bibliográfica sistemática, de caráter qualitativo e descritivo, voltada à investigação da ocorrência e detecção de Contaminantes de Preocupação Emergente (CpE) na Bacia do Alto Tietê. Para a construção deste estudo, o levantamento de dados foi realizado por meio de consultas em bases de dados científicas de alto impacto, especificamente Web of Science, Science Direct, SciELO e Scopus. A estratégia de busca fundamentou-se no uso de descritores e termos de controle combinados em português e inglês, tais como "Contaminantes Emergentes" (*Emerging Contaminants*), "Bacia do Alto Tietê"

(*Alto Tietê Basin*), "Espectrometria de Massas" (*Mass Spectrometry*) e "Qualidade da Água" (*Water Quality*), utilizando-se operadores booleanos para refinar o cruzamento das informações.

O recorte temporal estabelecido compreendeu publicações realizadas majoritariamente entre 2006 e 2025, o que permitiu traçar um panorama da evolução das técnicas analíticas e do agravamento da poluição hídrica na região metropolitana de São Paulo. O processo de seleção dos trabalhos seguiu alguns critérios: inicialmente, foram identificados artigos e teses por meio da leitura de títulos e resumos, sendo descartados aqueles que não apresentavam correlação direta com a área geográfica de estudo ou que não detalharam as metodologias de análise química. Foram priorizados estudos que abordassem a quantificação de compostos em águas superficiais, subterrâneas e de abastecimento público, bem como trabalhos que debatessem o uso de técnicas como Extração em Fase Sólida (SPE) e Cromatografia Líquida de Alta Resolução.

Após a triagem inicial, os textos selecionados foram submetidos a uma leitura integral e crítica, permitindo a extração de dados técnicos sobre limites de detecção, taxas de recuperação e as principais classes de contaminantes detectadas, como fármacos, hormônios e pesticidas. Ao todo, a revisão consolidou informações de diversos estudos fundamentais que subsidiaram a discussão técnica sobre a eficiência dos métodos convencionais frente aos avanços da espectrometria de massas em tandem e de alta resolução. A síntese dos principais trabalhos utilizados nesta pesquisa, com seus respectivos autores, anos e temas centrais, encontra-se organizada na tabela a seguir.

RESULTADO E DISCUSSÃO

A análise da literatura revela que a Bacia do Alto Tietê (UGRHI 6) apresenta um cenário crítico de contaminação por compostos emergentes, diretamente relacionado à densidade demográfica superior a 20 milhões de habitantes e ao histórico de urbanização desordenada. Os estudos de Montagner et al. (2019) e Farto et al. (2021) convergem ao apontar a cafeína como um dos principais

indicadores de contaminação por esgoto doméstico na região, evidenciando que a presença desse composto em águas superficiais está invariavelmente associada ao descarte de efluentes insuficientemente tratados. Esse panorama é agravado pelo fenômeno do reuso indireto, no qual a água captada para abastecimento em trechos a jusante já apresenta cargas significativas de fármacos, hormônios e outros micropoluentes oriundos de centros urbanos localizados a montante.

Além da cafeína, diversos estudos reportam a ocorrência recorrente de fármacos anti-inflamatórios, hormônios esteróides, antibióticos e produtos de higiene pessoal em concentrações que variam predominantemente da ordem de nanogramas por litro, podendo atingir microgramas por litro em áreas sob maior influência de esgotos domésticos e efluentes industriais. Esses resultados reforçam que a contaminação química na Bacia do Alto Tietê é contínua e difusa, refletindo tanto a predominância das fontes domésticas quanto a contribuição industrial, especialmente em trechos urbanos densamente ocupados.

Um ponto crítico que emerge desta revisão é a acentuada discrepância entre os parâmetros de monitoramento exigidos pela legislação ambiental brasileira e a complexidade química observada nos corpos hídricos da região. Conforme discute Ramalho (2025), as normas vigentes, como as resoluções do CONAMA, concentram-se majoritariamente em indicadores tradicionais de qualidade da água, tais como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes e parâmetros físico-químicos básicos. No entanto, os estudos analisados demonstram que a conformidade com esses indicadores não implica, necessariamente, a ausência de riscos ambientais e à saúde humana, uma vez que misturas complexas de contaminantes emergentes permanecem presentes em níveis de traço. Esses compostos, por não integrarem rotinas obrigatórias de monitoramento, tornam-se “invisíveis” aos sistemas de controle, apesar de seu potencial de bioacumulação, toxicidade crônica e desregulação endócrina em organismos aquáticos e populações humanas expostas.

No que se refere aos métodos analíticos empregados, os resultados indicam que a elevada complexidade das matrizes aquáticas da Bacia do Alto Tietê impõe a necessidade de etapas rigorosas de preparo de amostras para garantir a confiabilidade das análises. A Extração em Fase Sólida (SPE), conforme demonstrado por Barrionuevo e Lanças (2001), destaca-se como etapa fundamental,

permitindo a concentração dos analitos em níveis compatíveis com os limites de detecção instrumental, além da remoção de interferentes orgânicos que poderiam comprometer a seletividade analítica. Rigobello et al. (2015) corroboram essa necessidade ao compararem a composição química de águas urbanas da região à complexidade de lixiviados de aterros sanitários, ressaltando que o monitoramento de substâncias como bisfenol A, pesticidas e fármacos exige tecnologias que as Estações de Tratamento de Água e Esgoto convencionais ainda não operam de forma ampla.

A evolução das técnicas de detecção evidencia uma transição progressiva dos métodos cromatográficos convencionais para técnicas hífenadas de maior sensibilidade e seletividade. Embora HPLC-DAD e GC-MS tenham desempenhado papel relevante nos estudos iniciais, limitações relacionadas à detecção de compostos polares e termolábeis são amplamente reconhecidas. Nesse contexto, López-Fernández et al. (2020) destacam que o LC-MS/MS consolidou-se como o padrão-ouro para a análise de contaminantes emergentes, sobretudo devido ao uso do modo de monitoramento de reações múltiplas (MRM), que reduz significativamente o ruído de fundo em matrizes com elevada carga orgânica, como as águas do Rio Tietê. De forma complementar, Barbosa Barbero (2020) evidencia que a aplicação da Cromatografia Líquida de Alta Resolução acoplada à espectrometria de massas (LC-HRMS) amplia as fronteiras do monitoramento ambiental, permitindo a realização de triagens não-alvo e a identificação de produtos de degradação e contaminantes ainda não regulamentados.

Com base no conjunto de estudos analisados, observa-se que a maioria dos artigos revisados concentra-se especificamente na Bacia do Alto Tietê (UGRHI 6) ou em ambientes urbanos diretamente representativos de sua realidade ambiental. Do total de trabalhos considerados, seis estudos tratam de forma direta da Bacia do Alto Tietê e da Região Metropolitana de São Paulo, incluindo investigações em águas superficiais, afluentes urbanos e efluentes sanitários, enquanto três estudos apresentam caráter metodológico ou comparativo, sendo utilizados como suporte técnico para a interpretação dos resultados obtidos na bacia. No que se refere às técnicas analíticas, verifica-se um predomínio claro do uso da Extração em Fase Sólida (SPE) como etapa de preparo de amostras, empregada em praticamente todos os estudos voltados à análise de contaminantes emergentes, devido à sua

eficiência na concentração de analitos em níveis de nanogramas por litro e na remoção de interferentes de matriz. Quanto às técnicas de detecção, os métodos cromatográficos hifenados foram os mais utilizados, com destaque para o LC-MS/MS, amplamente adotado como padrão-ouro em função de sua elevada sensibilidade e seletividade para compostos polares e termolábeis, seguido pelo GC-MS para analitos mais voláteis e pelo HPLC-DAD em estudos iniciais ou de triagem. Mais recentemente, observa-se a incorporação do LC-HRMS, aplicado em um número menor de trabalhos, porém com papel estratégico na identificação de contaminantes não previamente monitorados, evidenciando uma tendência de avanço metodológico nas pesquisas voltadas à avaliação da qualidade das águas da Bacia do Alto Tietê.

Quadro 1: Ocorrência de Contaminantes Emergentes na Bacia do Alto Tietê e Região Metropolitana de São Paulo.

Autor (Ano)	Contaminantes Identificados	Concentração Reportada (Média/Máxima)	Matriz Ambiental	Técnica Analítica
Montagner et al. (2019)	Cafeína, Bisfenol A, Hormônios, Fármacos, Drogas ilícitas	Cafeína: até 127.092 ng/L; Bisfenol A: até 13.016 ng/L	Água superficial, Potável e Esgoto	SPE / LC-MS/MS
Fatuch et al. (2023)	Cafeína, Fármacos, Agrotóxicos e Compostos Industriais (Nonilfenol)	Variável (Revisão sistemática de mananciais)	Água superficial (Billings, Guarapiranga, Rio Grande)	SPE / LC-MS/M, GC-MS e HPLC-DAD

Farto et al. (2021)	Atenolol, Ibuprofeno, Diclofenaco, Paracetamol e Hormônios (Estrona)	Atenolol: até 51.036 ng/L; Ibuprofeno: até 3.062 ng/L	Esgoto (bruto e tratado) e Água superficial	LC-MS/MS e GC-MS
Branco et al. (2021)	Atrazina, Clorpirifós, Bisfenol A, Cafeína e Hexaclorobutadieno	Cafeína: 160 µg/L; Hexaclorobutadieno: 2 µg/L ¹⁴	Água superficial (Rios Tietê e Pinheiros)	LC-MS/MS e GC-MS
Vasques e Moraes (2024)	Bisfenol A, 17α-etinilestradiol, 17β-estradiol e Estrona	Faixas de monitoramento oficial (CETESB)	Água superficial (Alto Tietê e interior de SP)	LC-MS/MS
Campestrini e Jardim (2017)	Drogas ilícitas (Cocaína e Benzoilecgonina)	Deteção em mananciais urbanos	Água superficial (Represas e Rios da UGRHI 6)	SPE / LC-MS/MS

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, os resultados discutidos demonstram que a problemática dos contaminantes emergentes na Bacia do Alto Tietê transcende a simples avaliação de parâmetros convencionais de qualidade da água, exigindo abordagens analíticas avançadas e integradas. A adoção dessas técnicas é essencial para subsidiar diagnósticos mais realistas da contaminação química da bacia e reforça a necessidade urgente de atualização das políticas públicas de saneamento e monitoramento ambiental, de modo a compatibilizá-las com os desafios impostos pela complexidade química dos ambientes aquáticos urbanos.

CONCLUSÕES

A realização desta revisão bibliográfica permitiu consolidar a compreensão de que a presença de Contaminantes de Preocupação Emergente (CpE) na Bacia do Alto Tietê não é apenas um desafio técnico, mas uma questão crítica de saúde pública e sustentabilidade ambiental. O estudo evidenciou que a Região Metropolitana de São Paulo, devido à sua densidade demográfica e intensa atividade industrial, funciona como um ponto de pressão extrema sobre os recursos hídricos, onde indicadores como a cafeína e hormônios sintéticos revelam a fragilidade dos sistemas de saneamento convencionais. Conclui-se que o reuso indireto da água, prática comum na região, exige uma atenção redobrada, uma vez que as Estações de Tratamento de Água (ETAs) atuais não foram projetadas para a remoção completa dessas substâncias em níveis de traço.

No campo analítico, a pesquisa confirmou que a evolução das técnicas de detecção é a principal ferramenta para tornar o "invisível" detectável. A transição para métodos de alta seletividade e sensibilidade, como o LC-MS/MS e o LC-HRMS, mostra-se indispensável. Enquanto o primeiro garante a quantificação precisa de alvos conhecidos e termolábeis, o segundo expande as fronteiras do monitoramento ao permitir a triagem não-alvo, identificando subprodutos de degradação que escapariam aos métodos tradicionais. A integração dessas tecnologias com etapas de preparo de amostras robustas, como a Extração em Fase Sólida (SPE), é o que permite alcançar os limites de detecção necessários para subsidiar decisões baseadas em dados científicos sólidos.

Fica evidente, portanto, a urgência em modernizar o arcabouço regulatório brasileiro. A comparação entre as exigências legais vigentes e as descobertas científicas recentes demonstra que o monitoramento baseado apenas em parâmetros físico-químicos e bacteriológicos clássicos é insuficiente para garantir a segurança hídrica no século XXI. É necessário que as políticas públicas incorporem gradualmente o monitoramento de classes prioritárias de contaminantes emergentes, especialmente em bacias críticas como a do Alto Tietê.

Por fim, este trabalho contribui para o campo do saneamento e gestão

ambiental ao sistematizar o conhecimento sobre as ferramentas analíticas disponíveis, servindo como subsídio para que gestores e pesquisadores busquem soluções de tratamento mais avançadas, como processos de oxidação avançada ou membranas de filtragem, que possam ser futuramente integradas às ETEs. A preservação da Bacia do Alto Tietê depende, fundamentalmente, da capacidade de alinhar o rigor científico das técnicas de detecção à implementação de políticas de gestão de recursos hídricos mais resilientes e tecnologicamente atualizadas.

REFERÊNCIAS

PAUN, I.; PASCU, L. F.; IANCU, V. I.; PIRVU, F.; GALAON, T.; CHIRIAC, F. L. Simultaneous Determination of 17 Phenolic Compounds in Surface Water and Wastewater Matrices Using an HPLC-DAD Method. *Environments*, v. 11, n. 1, 2024.

BARBOSA BARBERO, S. Desarrollo de metodologías analíticas para la caracterización y autenticación de fármacos y alimentos derivados de productos naturales de origen vegetal y ricos en polifenoles. 2020. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Facultad de Química, Universitat de Barcelona, Barcelona, 2020.

BARRIONUEVO, W. R.; LANÇAS, F. M. Extração em fase sólida (SPE) e micro extração em fase sólida (SPME) de piretróides em água. *Química Nova*, v. 24, n. 2, p. 172-175, 2001.

BRANCO, F. O. L.; CÁRDENAS, S. M. M.; SERRÃO, I. C. G.; CUNHA, I. R. V. da; AMADO, L. L.; KÜTTER, V. T. Contaminantes Emergentes nas Bacias Hidrográficas Brasileiras e seus potenciais efeitos a espécies ameaçadas de extinção. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 9, n. 2, p. 140-174, 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ. Relatório de situação dos recursos hídricos da UGRHI 06 – Alto Tietê: ano-base 2023. São Paulo: CBH-AT, 2024. Aprovado pela Deliberação CBH-AT nº 190, de 5 de dezembro de 2024.

FARTO, C. D.; JÚNIOR, G. B. A.; SENA, R. F. de; ROSENHAIM, R. Contaminantes de preocupação emergente no Brasil na década 2010-2019 Parte I: ocorrência em diversos ambientes aquáticos. REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 18, e6, 2021.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. Observando o Tietê 2025: o retrato da qualidade da água e a evolução dos indicadores de impacto do Projeto Tietê. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2025.

HUSSEIN, J. Principles and Applications of High-Performance Liquid Chromatography (HPLC): A Review. Biomedical and Pharmacology Journal, v. 18, 2025.

KRAUSS, M.; SINGER, H.; HOLLENDER, J. LC-high resolution MS in environmental analysis: from target analysis to broad screening. Analytical and Bioanalytical Chemistry, v. 397, n. 3, p. 943-951, 2010.

LÓPEZ-FERNÁNDEZ, O.; DOMÍNGUEZ, R.; PATEIRO, M.; MUNEKATA, P. E. S.; ROCCHETTI, G.; LORENZO, J. M. Determination of Polyphenols Using Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry Technique (LC-MS/MS): A Review. Antioxidants, v. 9, n. 6, p. 479, 2020.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. Química Nova, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

MONTAGNER, C. C.; SADRÉ, F. F.; ACAYABA, R. D.; VIDAL, C.; CAMPESTRINI, I.; LOCATELLI, M. A.; PESCARA, I. C.; ALBUQUERQUE, A. F.; UMBUZEIRO, G. A.; JARDIM, W. F. Ten Years-Snapshot of the Occurrence of Emerging Contaminants in Drinking, Surface and Ground Waters and Wastewaters from São Paulo State, Brazil. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 30, n. 3, p. 614-632, 2019.

RAMALHO, R. T. E. Análise da qualidade da água e identificação de contaminantes emergentes no estuário do Rio Paraíba-PB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2025.

RICHARDSON, S. D.; TERNES, T. A. Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues. *Analytical Chemistry*, v. 92, n. 1, p. 473-505, 2020.

RIGOBELLO, E. S.; SCANDELA, A. P. J.; CORSO, B. L.; TAVARES, C. R. Identificação de compostos orgânicos em lixiviado de aterro sanitário municipal por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas. *Química Nova*, v. 38, n. 6, p. 794-800, 2015.

VASQUES, V. G.; MORAES, M. L. L. Avaliação preliminar do monitoramento de desreguladores endócrinos em águas superficiais no estado de São Paulo. *GESTA - Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 12, n. 2, p. 52-65, 2024.