



Detectando o invisível: O papel da Química Analítica no controle da poluição

Elenir Souza Santos Rocha¹
Robson Silva da França²
Dilaine Suellen Caires Neves³
André Alves dos Santos⁴
Anderson Santos Souza⁵

1. elenirsantos@yahoo.com.br; 2. robsonsilvafranca@gmail.com; 3. dilainecaires12@gmail.com;
4. anvesantos@gmail.com; 5. aelsonjq@gmail.com.

1. Doutora em Química Analítica e Professora da Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista -Bahia; 2. Mestre em Química Analítica e Técnico em Química da Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista -Bahia; 3. Doutora em Química Analítica e Técnica em Química da Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista -Bahia; 4. Graduação em Farmácia pela Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista - Bahia. Avenida Olívia Flores, nº 3000 – Bairro Candeias, Vitória da Conquista – Bahia. CEP: 45000-000; 5. Doutor em Química Analítica e Professor da Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista -Bahia.

Resumo

A poluição ambiental representa um dos maiores desafios sanitários e ecológicos da contemporaneidade, caracterizando-se, em grande parte, pela presença de substâncias nocivas em concentrações imperceptíveis aos sentidos humanos. Nesse contexto, a Química Analítica emerge como área essencial para revelar contaminantes imperceptíveis a olho nu, fornecendo as bases científicas e instrumentais para a detecção, identificação e quantificação de poluentes em matrizes ambientais complexas. O presente manuscrito apresenta uma atualização crítica sobre o papel da Química Analítica no monitoramento e no controle da poluição. São discutidos os principais grupos de poluentes, incluindo contaminantes inorgânicos, poluentes orgânicos persistentes, agrotóxicos e contaminantes emergentes, como fármacos, disruptores endócrinos e microplásticos, distribuídos em diferentes matrizes ambientais, como água, solo, ar e biota. Também são abordados os métodos analíticos instrumentais amplamente empregados no monitoramento ambiental, incluindo técnicas espectroscópicas, cromatográficas e eletroquímicas, com ênfase nos parâmetros de qualidade analítica que garantem a confiabilidade dos resultados. O artigo contempla ainda o marco regulatório nacional e internacional, evidenciando lacunas legislativas frente ao surgimento de novos contaminantes, além de discutir tendências promissoras, como a Química Analítica Verde, a miniaturização de sistemas, os biossensores e a aplicação de inteligência artificial no tratamento de dados ambientais. Conclui-se que o avanço contínuo da Química Analítica constitui condição indispensável para o monitoramento eficaz da qualidade ambiental e para o suporte científico às políticas de gestão ambiental.

Palavras-chave: química analítica ambiental; contaminantes emergentes; monitoramento ambiental; métodos instrumentais; controle da poluição.

Introdução

A poluição ambiental tornou-se um dos maiores desafios sanitários e ecológicos da atualidade, afetando diretamente a qualidade de vida das populações e o equilíbrio dos ecossistemas. Grande parte dos contaminantes presentes no ambiente não pode ser percebida



pelos sentidos humanos, permanecendo invisível no ar, na água, no solo e nos organismos vivos. Metais tóxicos dissolvidos em mananciais, resíduos de medicamentos em rios urbanos, agrotóxicos em áreas agrícolas e microplásticos dispersos nos oceanos são exemplos de substâncias que, mesmo em baixas concentrações, podem provocar impactos significativos à saúde humana e ao meio ambiente. Nesse cenário, o crescimento das atividades industriais, urbanas e agropecuárias intensificou a liberação de contaminantes nos ecossistemas, ampliando a necessidade de monitoramento ambiental contínuo e confiável.

Diante dessa realidade, a Química Analítica Ambiental assumiu papel fundamental na identificação, detecção e quantificação de poluentes em diferentes matrizes ambientais. Por meio do desenvolvimento de técnicas instrumentais cada vez mais sensíveis e precisas, tornou-se possível transformar substâncias imperceptíveis em informações científicas capazes de orientar ações de controle, prevenção e gestão ambiental. Técnicas cromatográficas, espectroscópicas, eletroquímicas e espectrométricas passaram a permitir a detecção de contaminantes em concentrações extremamente baixas, contribuindo para avaliações de risco, estabelecimento de limites regulatórios e formulação de políticas públicas voltadas à proteção ambiental e da saúde coletiva.

Ao mesmo tempo, novos desafios vêm surgindo com a crescente presença dos chamados contaminantes emergentes, como substâncias per- e polifluoroalquiladas (PFAS), disruptores endócrinos, resíduos farmacêuticos, nanoplásticos e microplásticos. Muitos desses compostos apresentam elevada persistência ambiental, potencial de bioacumulação e efeitos tóxicos ainda não totalmente compreendidos, o que evidencia a necessidade de atualização constante das metodologias analíticas e dos marcos regulatórios ambientais. Nesse contexto, os avanços tecnológicos recentes têm ampliado significativamente as possibilidades do monitoramento ambiental, incorporando sensores portáteis, sistemas miniaturizados, biossensores, espectrometria de massas de alta resolução, inteligência artificial, quimiometria e ferramentas de automação analítica.

Paralelamente, cresce a preocupação com o desenvolvimento de métodos mais sustentáveis, alinhados aos princípios da Química Analítica Verde, buscando reduzir o consumo de solventes tóxicos, minimizar a geração de resíduos laboratoriais e tornar os processos analíticos mais eficientes e ambientalmente responsáveis. A integração entre tecnologias inteligentes, análise de dados em tempo real e estratégias sustentáveis vem redefinindo a atuação da Química Analítica Ambiental, ampliando sua importância no enfrentamento da poluição contemporânea.



Nesse contexto, o presente manuscrito apresenta uma atualização crítica sobre o papel da Química Analítica no monitoramento e no controle da poluição ambiental, discutindo avanços metodológicos, desafios contemporâneos, tendências tecnológicas e aspectos regulatórios relacionados à detecção de contaminantes em diferentes matrizes ambientais.

Percurso metodológico

O presente manuscrito caracteriza-se como um Artigo de Atualização (Update Article), desenvolvido com o objetivo de apresentar um panorama crítico e contemporâneo sobre o papel da Química Analítica no monitoramento e no controle da poluição ambiental, contemplando avanços metodológicos, tecnológicos e regulatórios relacionados à detecção de contaminantes em diferentes matrizes ambientais.

Para sua elaboração, realizou-se levantamento bibliográfico de produções científicas nacionais e internacionais publicadas predominantemente entre os anos de 2019 e 2026, abrangendo artigos científicos, documentos institucionais, legislações ambientais, diretrizes técnicas e relatórios de organismos nacionais e internacionais. As buscas foram realizadas nas bases de dados ScienceDirect, Scopus, Web of Science, PubMed, SpringerLink, MDPI e Google Scholar, utilizando descritores em português e inglês relacionados aos temas centrais do manuscrito, como Química Analítica Ambiental, monitoramento ambiental, contaminantes emergentes, espectrometria de massas e Química Analítica Verde.

A seleção das fontes priorizou artigos revisados por pares, documentos oficiais e publicações com relevância científica reconhecida, com foco em estudos que abordassem técnicas analíticas aplicadas ao monitoramento ambiental, validação de métodos, legislação ambiental e tendências tecnológicas contemporâneas. Trabalhos duplicados, sem relação direta com o escopo temático ou sem fundamentação metodológica consistente foram desconsiderados.

O conteúdo foi organizado em eixos temáticos estruturantes, fundamentos da Química Analítica Ambiental, classificação dos poluentes, matrizes ambientais, técnicas analíticas, validação e qualidade analítica, legislação ambiental e tendências tecnológicas contemporâneas, e interpretado de forma qualitativa e integrativa, buscando estabelecer relações entre os avanços científicos da área e os desafios atuais do controle da poluição ambiental.

A Química Analítica como ciência da detecção e quantificação



A Química Analítica pode ser compreendida como a ciência da detecção e da mensuração, tendo como propósito central responder a duas questões fundamentais: *o que está presente?* e *em que quantidade?* No contexto ambiental, abrange a análise de poluentes orgânicos, inorgânicos e radioativos em diferentes matrizes. Trata-se de área intrinsecamente interdisciplinar, que articula princípios da química, física, biologia e ciências ambientais para converter componentes não diretamente perceptíveis em informações confiáveis e cientificamente validadas (TSAKOVSKI; VENELINOV, 2024).

Historicamente, a Química Analítica percorreu longo caminho, durante o século XIX e, sobretudo, no século XX, a área passou por consolidação científica, estabelecendo-se como ramo autônomo da química com aplicações amplas no meio ambiente, na saúde e em diversas áreas da ciência e da tecnologia (KARAYANNIS; EFSTATHIOU, 2012). Avanços significativos incluem o surgimento da cromatografia gasosa comercial na década de 1950, o desenvolvimento da espectrometria de absorção atômica (AAS) nas décadas de 1960-70 e a consolidação da espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) como técnica de referência para análise multielementar em concentrações ultratraço (CHRISTIAN, 2020). No século XXI, o uso de ferramentas como o aprendizado de máquina torna-se crescentemente relevante diante do grande volume de dados gerados por técnicas modernas, como a espectrometria de massas de alta resolução, paralelamente à incorporação dos princípios da Química Analítica Verde (SHIMKO *et al.*, 2022).

A ciência analítica desempenha papel fundamental no avanço da compreensão sobre contaminação ambiental, na identificação de objetivos de proteção e na viabilização de estratégias de remediação. O químico analítico ambiental atua como sentinela: antes que qualquer decisão regulatória ou preventiva possa ser tomada, é necessário saber o que está presente, onde está e em que concentração. As tendências mais recentes apontam para o uso crescente de tecnologias portáteis e de uso remoto, bem como de aprendizado de máquina para interpretação de grandes conjuntos de dados em tempo real (SHIMKO *et al.*, 2022).

Natureza e classificação dos poluentes ambientais

A poluição ambiental consiste na introdução de substâncias ou energia no meio ambiente que provocam alterações físicas, químicas e biológicas com efeitos negativos sobre os ecossistemas e a saúde humana (RIBEIRO, 2019). O PNUMA identifica seis grandes tipos de poluição: do ar, da água doce, da terra e solo, marinha, química e por resíduos (PNUMA, [s. d.]). Os poluentes atmosféricos dividem-se em primários, emitidos diretamente na



atmosfera, e secundários, formados na atmosfera a partir de precursores, sendo o ozônio troposférico o exemplo mais representativo (VONGELIS, 2025).

Poluentes inorgânicos, POPs e contaminantes emergentes

Os metais tóxicos figuram entre os contaminantes de maior preocupação histórica. Metais como arsênio (As), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cádmio (Cd) e cromo (Cr) contaminam ecossistemas tanto por processos naturais quanto por atividades humanas como mineração, produção de couro, processamento de metais e agricultura (MUSADIS; SILVEIRA, 2024). O chumbo é associado a déficits cognitivos e danos neurológicos em crianças; o cádmio provoca danos renais e osteoporose; o arsênio inorgânico é classificado como carcinogênico do Grupo 1 (KHAN *et al.*, 2022; KAUR *et al.*, 2024). A detecção de metais exige técnicas de alta sensibilidade: a AAS permite quantificação em água, solo e amostras biológicas; o ICP-OES oferece ampla faixa linear dinâmica para análise multielementar; e o ICP-MS é a técnica de referência para análises em nível ultratraço, com limites de detecção na faixa de partes por trilhão (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2009).

Os poluentes orgânicos persistentes (POPs) resistem à degradação fotolítica, química e biológica, bioacumulando-se ao longo da cadeia trófica. Incluem pesticidas organoclorados (DDT, aldrin, dieldrin), bifenilas policloradas (PCBs), dioxinas, furanos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs). Os PAHs, gerados pela combustão incompleta de matéria orgânica, são amplamente distribuídos em sedimentos de rios e estuários, constituindo grupo de elevada preocupação ecotoxicológica (GUARDANS, 2024). Os contaminantes emergentes abrangem fármacos e produtos de higiene pessoal (Pharmaceuticals and Personal Care Products, PPCPs), substâncias per- e polifluoroalquiladas (PFAS), disruptores endócrinos (Endocrine Disrupting Compounds, EDCs) e micro/nanoplásticos, crescentemente detectados em diversas matrizes ambientais. A maioria não possui limites regulamentados nos padrões de qualidade da água em nenhum país (BOAHEN *et al.*, 2025). As PFAS, denominadas "químicos eternos", foram detectadas em amostras de sangue humano ao redor do mundo; um estudo global realizado em 2024 com 45.000 amostras de águas subterrâneas constatou que 31% continham níveis de PFAS prejudiciais à saúde humana (ACKERMAN GRUNFELD *et al.*, 2024).

Matrizes ambientais: onde o invisível se esconde





O preparo de amostras constitui etapa fundamental na análise química, exercendo influência direta sobre a confiabilidade dos resultados. Técnicas como Extração em Fase Sólida (Solid-Phase Extraction, SPE) e Microextração em Fase Sólida (Solid-Phase Microextraction, SPME) continuam sendo amplamente empregadas, com avanços em novos materiais sorventes, incluindo polímeros molecularmente impressos (MIPs), redes metal-orgânicas (Metal-Organic Frameworks, MOFs) e materiais baseados em carbono, como grafeno, nanotubos de carbono e carvão ativado (MARTÍNEZ-PÉREZ-CEJUELA; GIONFRIDDO, 2025).

As matrizes ambientais, água, solo, sedimentos e ar, configuram sistemas dinâmicos nos quais contaminantes se acumulam, sofrem transformações e se dispersam. Os contaminantes emergentes destacam-se por ocorrerem em baixas concentrações, mas com elevado potencial de impacto ecológico, especialmente em matrizes aquáticas, onde podem sofrer processos de sorção, transporte e bioacumulação (MONTAGNER; VIDAL; ACAYABA, 2017).

Nas **águas superficiais e subterrâneas**, compostos farmacêuticos, microplásticos, PFAS e agrotóxicos têm sido detectados de forma crescente em mananciais, reservatórios e aquíferos em todo o mundo. As águas subterrâneas merecem atenção especial pela sua vulnerabilidade: ao contrário das superficiais, apresentam dinâmica lenta de renovação, significando que a contaminação, uma vez instalada, pode persistir por décadas (DUCCI *et al.*, 2024; ROY, 2025). Para o **solo e sedimentos**, que atuam como reservatórios de contaminantes, a biodisponibilidade de metais tóxicos depende de pH, matéria orgânica e frações de argila, exigindo estratégias analíticas como a extração sequencial de Tessier. A análise de sedimentos fluviais e estuarinos tem papel especial no diagnóstico histórico da contaminação ambiental (KUMKRONG *et al.*, 2021). A **análise atmosférica** demanda estratégias de amostragem passiva e ativa específicas: para material particulado fino (MP2,5 e MP10), utilizam-se amostradores de alto volume; para COVs e COSVs, empregam-se tubos sorventes com dessorção térmica acoplada à CG-MS; inovações recentes incluem sistemas em drones para monitoramento vertical em tempo real (ERRAJI *et al.*, 2024). A **biota** funciona como bioindicador e bioacumulador da contaminação, integrando ao longo do tempo a exposição a contaminantes em concentrações abaixo dos limites analíticos de detecção em matrizes abióticas (GUARDANS, 2024).

Validação e grandezas analíticas fundamentais



A validação de métodos é condição indispensável para a confiabilidade dos resultados no monitoramento ambiental, avaliando seletividade, linearidade, precisão, exatidão, LOD, LOQ, efeito de matriz e incerteza de medição segundo protocolos do INMETRO, ANVISA e US EPA (BRASIL, 2017; INMETRO, 2020).

A confiabilidade de qualquer sistema de monitoramento ambiental depende de parâmetros analíticos como o limite de detecção (LOD) e o limite de quantificação (LOQ). O LOD é a menor quantidade ou concentração de um analito em uma amostra que pode ser detectada, mas não necessariamente quantificada, com um nível de confiança estatístico definido, enquanto o LOQ corresponde ao nível mínimo a partir do qual o analito pode ser quantificado com precisão e exatidão aceitáveis (IUPAC, 1995). Essas grandezas são críticas no monitoramento ambiental, pois muitos contaminantes exercem efeitos tóxicos em concentrações ultratraço, da ordem de partes por bilhão (ppb) ou partes por trilhão (ppt). Além do LOD e LOQ, a qualidade analítica é avaliada por sensibilidade, seletividade, especificidade e robustez. A complexidade das matrizes ambientais reais impõe a necessidade de selecionar, validar e constantemente aprimorar métodos capazes de obter limites de detecção mais baixos sem comprometer a rastreabilidade das medições, situação especialmente relevante no monitoramento de contaminantes emergentes (SHIMKO *et al.*, 2022).

Técnicas analíticas aplicadas ao monitoramento ambiental

As técnicas analíticas desempenham papel central no monitoramento ambiental, permitindo a identificação e quantificação de substâncias potencialmente nocivas presentes em diferentes matrizes: ar, água e solo. Entre as mais empregadas, destacam-se as cromatográficas e espectrométricas para análise de compostos orgânicos e metais em amostras ambientais, além de metodologias para análise de especiação química e determinação de contaminantes emergentes como pesticidas, fármacos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e microplásticos. A seleção adequada das estratégias analíticas é essencial para assegurar resultados precisos, reprodutíveis e comparáveis, servindo de base para interpretações ambientais confiáveis, com ênfase na determinação de elementos traço, agrotóxicos e microplásticos (MONTEIRO *et al.*, 2026).

Técnicas espectroscópicas e cromatográficas

As técnicas espectroscópicas constituem pilares do monitoramento inorgânico. A AAS permite a quantificação de metais tóxicos com alta sensibilidade e seletividade. O ICP-OES



consolidou-se como método de referência para análise multielementar, com ampla faixa linear dinâmica. O ICP-MS destaca-se pelos limites de detecção na faixa de partes por trilhão, sendo indispensável para contaminantes como arsênio e chumbo em água potável. A espectroscopia Raman (SERS) avança na identificação de nanoplásticos em águas naturais, enquanto a espectroscopia de fluorescência de raios X portátil (Portable X-ray Fluorescence, pXRF) viabiliza triagem in situ de metais em solos (SKOOG *et al.*, 2015; HOSSAIN *et al.*, 2025). A espectrometria de massas com ionização ambiente (Ambient Ionization Mass Spectrometry, AIMS) permite análise direta em estado nativo, com aplicações na detecção de pesticidas (HENDERSON; HEANEY; RANKIN-TURNER, 2025).

A cromatografia constitui a espinha dorsal da análise de contaminantes orgânicos. A cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS), destaca-se na identificação e quantificação de poluentes voláteis e semivoláteis, Poluentes Orgânicos Persistentes (Persistent Organic Pollutants, POPs), Bifenilas Policloradas (Polychlorinated Biphenyls, PCBs), Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) e dioxinas. Para compostos polares, termolábeis ou de elevada massa molecular, como fármacos, hormônios e PFAS, a cromatografia líquida de alta eficiência acoplada à espectrometria de massas em tandem (High-Performance Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry, HPLC-MS/MS) e a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas de alta resolução (Liquid Chromatography-High Resolution Mass Spectrometry, LC-HRMS) configuram-se como técnicas analíticas de referência, permitindo a detecção em níveis de picograma por litro em matrizes aquosas complexas. A cromatografia líquida de ultraeficiência (Ultra-High Performance Liquid Chromatography, UHPLC) reduz significativamente os tempos de análise sem comprometer a resolução (RICHARDSON; KIMURA, 2020; FARRELL *et al.*, 2023).

Associadas às técnicas espectroscópicas atômicas descritas, destacam-se duas modalidades especializadas de introdução e geração de analitos voláteis, a Geração de Hidreto (HG) e a Geração de Vapor Frio (CVG), amplamente empregadas para potencializar a sensibilidade na determinação de elementos específicos

Geração de Hidreto (HG, Hydride Generation)

A geração de hidreto é uma técnica de introdução de amostras amplamente empregada em espectrometria atômica para a determinação de elementos formadores de hidretos voláteis, como arsênio (As), selênio (Se), antimônio (Sb), bismuto (Bi), estanho (Sn), telúrio (Te),



chumbo (Pb) e germânio (Ge). O princípio baseia-se na reação do analito, previamente reduzido ao estado de oxidação adequado, com borohidreto de sódio (NaBH_4) em meio ácido (geralmente HCl), gerando hidretos gasosos instáveis, como a arsina (AsH_3) e a estibina (SbH_3), que são transportados por fluxo de gás inerte (argônio ou nitrogênio) até o atomizador. Essa separação do analito da matriz líquida proporciona ganhos expressivos de sensibilidade, com limites de detecção tipicamente na faixa de ng.L^{-1} (ppt), além de reduzir significativamente as interferências espectrais e não-espectrais associadas à introdução direta de solução (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2009).

A técnica de geração de hidreto pode ser acoplada a diferentes detectores atômicos, sendo os mais comuns a espectrometria de absorção atômica com atomização em chama (HG-FAAS), em forno de grafite (HG-GFAAS) e, especialmente, a espectrometria de fluorescência atômica (HG-AFS), além do plasma indutivamente acoplado com detecção por espectrometria de massa (HG-ICP-MS). Avanços na miniaturização e automação dos sistemas de geração de hidreto, com destaque para arranjos em fluxo contínuo e injeção em fluxo (FIA-HG), têm aumentado a frequência analítica e reduzido o consumo de reagentes. A principal limitação da técnica reside nas interferências por metais de transição, como Cu^{2+} , Ni^{2+} e Co^{2+} , que inibem a formação ou decomposição dos hidretos, exigindo etapas de separação ou uso de modificadores químicos (LONG *et al.*, 2012).

Geração de Vapor Frio (CVG, Cold Vapor Generation)

A geração de vapor frio é uma técnica específica para a determinação de mercúrio (Hg) total, fundamentada na propriedade singular desse elemento de existir como vapor monoatômico (Hg^0) em temperatura ambiente e pressão atmosférica. O método consiste na redução química do Hg^{2+} presente na amostra por agentes redutores, tradicionalmente o cloreto estanoso (SnCl_2) em meio ácido ou, para determinações de mercúrio total incluindo organocompostos, o borohidreto de sódio (NaBH_4), com geração de vapor de mercúrio elementar que é arrastado por fluxo de gás inerte até a célula de absorção do espectrômetro, sem necessidade de atomização térmica. A técnica é dotada de alta sensibilidade, com limites de detecção na faixa de 0,01 a 0,1 $\mu\text{g.L}^{-1}$ quando acoplada à absorção atômica (CV-AAS), e de 0,001 a 0,01 $\mu\text{g.L}^{-1}$ com fluorescência atômica (CV-AFS) (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2009).

A técnica apresenta elevada seletividade para o Hg, uma vez que nenhum outro elemento forma vapor monoatômico estável nas condições do ensaio. Desenvolvidos



recentes têm incorporado a geração fotoquímica de vapor frio (foto-CVG), na qual a redução do Hg é induzida por irradiação ultravioleta na presença de ácido fórmico ou outros doadores de elétrons, eliminando o uso de reagentes tóxicos como o SnCl_2 e reduzindo interferências. A técnica tem papel central no monitoramento ambiental do mercúrio, elemento reconhecido como um dos contaminantes mais tóxicos e onipresentes no planeta, com especial preocupação para o metilmercúrio (MeHg) formado por atividade microbiana em sedimentos aquáticos e bioacumulado na cadeia trófica (ZHENG *et al.*, 2005; SU *et al.*, 2022).

Complementando o repertório de técnicas espectroscópicas, as técnicas eletroquímicas representam alternativa de alta sensibilidade e baixo custo para o monitoramento em campo.

Técnicas eletroquímicas

Os sensores eletroquímicos oferecem alta sensibilidade, com limites de detecção da ordem de pmol.L^{-1} para alguns analitos, aliados à rapidez analítica e custo reduzido. Plataformas inovadoras incluem sensores molecularmente impressos para fármacos em águas superficiais e sensores potenciométricos à base de nanotubos de carbono para mercúrio e cádmio (BOUNEGRU *et al.*, 2025). Dispositivos analíticos eletroquímicos em papel (ePADs) permitem detecção multianalito em campo com conectividade via Bluetooth ou NFC, democratizando o monitoramento ambiental (SINGH *et al.*, 2025).

Legislação e padrões de qualidade ambiental

A legislação e os padrões de qualidade ambiental constituem instrumentos fundamentais para a proteção dos ecossistemas e da saúde pública, estabelecendo limites máximos de concentração para poluentes e critérios para o monitoramento ambiental (BRASIL, 2024).

Marco regulatório brasileiro

O arcabouço regulatório brasileiro em qualidade ambiental é estruturado principalmente pelas Resoluções do CONAMA. A Resolução CONAMA nº 357/2005, complementada pela nº 430/2011, estabelece a classificação dos corpos d'água e os padrões de qualidade para diferentes usos, definindo limites para dezenas de parâmetros físico-químicos e biológicos, de pH, turbidez e oxigênio dissolvido a metais tóxicos, agrotóxicos e compostos orgânicos (BRASIL, 2005). A Resolução CONAMA nº 491/2018 adotou os padrões intermediários e finais recomendados pela OMS para material particulado fino (MP2,5 e MP10) e para dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e ozônio (BRASIL, 2018). Para solos contaminados, a Resolução CONAMA nº 420/2009 estabelece valores orientadores de



qualidade (VRQ), de prevenção (VP) e de investigação (VI) para metais, metaloides e compostos orgânicos (BRASIL, 2009).

No âmbito dos agrotóxicos na água potável, a Portaria GM/MS nº 888/2021 representou avanço ao ampliar o painel de pesticidas monitorados de 28 para 54 substâncias (BRASIL, 2023); contudo, especialistas apontam que esse número ainda é insuficiente diante do volume de ingredientes ativos aprovados para uso no Brasil, um dos maiores mercados de agrotóxicos do mundo, permanecendo lacunoso quanto à maioria dos contaminantes emergentes. A ausência de parâmetros regulamentados para fármacos, PFAS e microplásticos em legislações nacionais é emblemática do descompasso entre o conhecimento científico disponível e a atualização normativa (BRASIL, 2023; MONTAGNER; VIDAL; ACAYABA, 2017).

Referências internacionais e lacunas regulatórias globais

No cenário internacional, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA) e as diretivas da União Europeia constituem importantes referenciais regulatórios para o controle de substâncias perfluoroalquiladas e polifluoroalquiladas, PFAS. Em abril de 2024, a EPA publicou a Regulamentação Nacional Primária de Água Potável (National Primary Drinking Water Regulation), considerada a primeira norma federal norte-americana a estabelecer limites legalmente obrigatórios para PFAS em água destinada ao consumo humano.

A regulamentação definiu níveis máximos de contaminantes (Maximum Contaminant Levels, MCLs) de $4,0 \text{ ng.L}^{-1}$ para ácido perfluorooctanoico (Perfluorooctanoic Acid, PFOA) e sulfonato de perfluorooctano (Perfluorooctane Sulfonate, PFOS), além de 10 ng.L^{-1} para ácido perfluorohexanossulfônico (Perfluorohexane Sulfonic Acid, PFHxS), ácido perfluorononanoico (Perfluorononanoic Acid, PFNA) e ácido hexafluoropropileno óxido dímero (Hexafluoropropylene Oxide Dimer Acid, HFPO-DA), conhecido comercialmente como GenX.

A norma também instituiu um Índice de Perigo (Hazard Index) como parâmetro regulatório para misturas contendo dois ou mais desses compostos, incluindo o ácido perfluorobutano sulfônico (Perfluorobutane Sulfonic Acid, PFBS) (United States, 2024). Entretanto, o panorama regulatório norte-americano permanece em constante atualização, visto que a EPA anunciou, em 2025, a intenção de revogar os padrões estabelecidos para PFHxS, PFNA, HFPO-DA e para o Índice de Perigo aplicado a misturas, com o objetivo de adequar as



determinações regulatórias ao processo previsto na Lei de Água Potável Segura (Safe Drinking Water Act) (United States, 2025).

Na União Europeia, a Diretiva-Quadro da Água (Water Framework Directive) representa o principal instrumento normativo voltado à proteção dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos, estabelecendo metas para alcançar o “bom estado” ecológico e químico das águas (European Union, 2000). Além disso, em setembro de 2025, os co-legisladores europeus firmaram um acordo provisório para revisar a lista de poluentes prioritários da legislação ambiental europeia, proposta ainda em tramitação legislativa, com votação plenária prevista para março de 2026. Entre as medidas propostas, destaca-se o fortalecimento do mecanismo denominado Lista de Vigilância (Watch List), destinado ao monitoramento de contaminantes emergentes, incluindo PFAS e resíduos farmacêuticos (EUROPEAN UNION, 2025).

Apesar dos avanços regulatórios recentes, persiste um descompasso global entre o desenvolvimento analítico, capaz de detectar substâncias em concentrações de partes por trilhão, e a atualização legislativa. Embora existam regulamentações em vigor, a maioria dos contaminantes emergentes ainda permanece sem governança adequada, representando sérios riscos aos ecossistemas e à saúde humana (WANG *et al.*, 2024; BAKARE-ABIDOLA; OLAOYE, 2025). Do total de substâncias químicas presentes no ambiente, menos de 1% está coberto por convenções internacionais e padrões ambientais regulamentados (ZHAO *et al.*, 2025).

O processo de incorporação de novos parâmetros às normas ambientais é frequentemente lento, burocraticamente complexo e sujeito a pressões econômicas e políticas, com disparidades significativas entre países quanto a limites de detecção, substâncias prioritárias e estratégias de remediação (BAKARE-ABIDOLA; OLAOYE, 2025). Essa lacuna implica que populações inteiras podem estar sendo expostas cronicamente a contaminantes cujos efeitos à saúde já são reconhecidos pela ciência, mas que ainda não motivaram ação regulatória efetiva, tornando imperativa a identificação proativa de contaminantes de alto risco e o estabelecimento de marcos regulatórios científicos para acelerar a resposta normativa e mitigar riscos ecológicos e sanitários (ZHAO *et al.*, 2025).

Tendências e inovações na Química Analítica Ambiental





A Química Analítica Ambiental vive um momento de intensa transformação, impulsionado por demandas crescentes de monitoramento e pelo avanço tecnológico. A integração da inteligência artificial (IA) com a Internet das Coisas (IoT) representa uma mudança transformadora no monitoramento e na gestão ambiental, viabilizando coleta avançada de dados, análise aprofundada e tomada de decisão mais eficaz (POPESCU *et al.*, 2024; RAHMAN *et al.*, 2024).

A integração da IA com tecnologias emergentes, como IoT e sensoriamento remoto, expandiu significativamente as capacidades de monitoramento ambiental em tempo real e a tomada de decisões orientada por dados. A introdução do edge computing permite a análise em tempo real dos dados ambientais em sua origem, facilitando respostas rápidas a incidentes de poluição (MUTLAG, *et al.*, 2026), enquanto modelos híbridos que combinam simulações físicas com aprendizado de máquina aumentam a precisão na identificação de fontes poluidoras (POPESCU *et al.*, 2024; CHEN *et al.*, 2025).

Química Analítica Verde

A Química Analítica Verde (GAC) emergiu como resposta ao paradoxo de que a química analítica, ao mesmo tempo em que monitora e denuncia a degradação ambiental, contribui para ela por meio do uso de solventes tóxicos, reagentes perigosos e geração de resíduos laboratoriais (ARMENTA; GARRIGUES; DE LA GUARDIA, 2008; MEHER; ZAROURI, 2025). Fundamentada em 12 princípios análogos aos da Química Verde geral, a GAC busca minimizar o impacto ambiental e os riscos à saúde dos analistas, priorizando métodos com menor consumo de solventes, menor geração de resíduos e menor demanda energética (GAŁUSZKA; MIGASZEWSKI; NAMIEŚNIK, 2013).

Para avaliar e comparar a sustentabilidade de métodos, foram desenvolvidas métricas específicas: o NEMI (National Environmental Methods Index), um dos mais antigos, baseia-se em pictograma de quatro quadrantes binários que avalia geração de resíduos, uso de reagentes persistentes ou tóxicos, condições corrosivas e volumes de resíduo gerado (KEITH; GRON; YOUNG, 2007).

Métricas mais recentes e abrangentes incluem o GAPI (Green Analytical Procedure Index), que utiliza escala de três níveis baseada em semáforo (vermelho-amarelo-verde) e considera mais critérios que o NEMI (PŁOTKA-WASYLKA, 2018); o AGREE (Analytical GREEnness calculator), baseado nos 12 princípios da GAC e que fornece um pictograma com pontuação de 0 a 1 (PENA-PEREIRA; WOJNOWSKI; TOBISZEWSKI, 2020); o AGREEprep, voltado especificamente para a etapa de preparo de amostras (WOJNOWSKI *et*



al., 2022); e a Analytical Eco-Scale, que atribui pontos de penalidade a cada aspecto que reduz a sustentabilidade do método (GAŁUSZKA *et al.*, 2012). A tendência mais recente é a avaliação multidimensional holística que integra simultaneamente sustentabilidade (componente verde), desempenho analítico (componente vermelho) e praticidade (componente azul), o conceito da Química Analítica Branca (WAC), superando as limitações das avaliações unidimensionais de greenness (SAJID; PŁOTKA-WASYLKA, 2022).

Miniaturização, portabilidade e automação

A miniaturização de sistemas analíticos está redefinindo os limites geográficos e temporais do monitoramento ambiental. Dispositivos Lab-on-a-chip integram múltiplas etapas analíticas, extração, separação, detecção, em microchips de poucos centímetros quadrados, com consumo mínimo de reagentes e capacidade de operação em campo sem infraestrutura laboratorial (LIU *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2025). Espectrômetros de massa portáteis permitem a detecção de COVs *in situ* com identificação confirmatória, enquanto espectrômetros Raman de mão viabilizam a triagem imediata de solos e sedimentos contaminados (ZHANG; ZHOU; HU, 2025), tecnologia de impressão 3D tornou possível a fabricação rápida e customizada de dispositivos de preparo de amostras e de células eletroquímicas adaptadas a matrizes específicas (PAN, *et al.*, 2025).

A automação de processos analíticos, por meio de sistemas de análise por injeção em fluxo (Flow Injection Analysis, FIA) e análise por injeção sequencial (Sequential Injection Analysis, SIA), além de plataformas robóticas de preparo de amostras, aumenta o rendimento analítico, reduz erros humanos e melhora a reprodutibilidade (TROJANOWICZ; PYSZYNSKA, 2022). Redes de sensores IoT (Internet of Things) integradas a plataformas de armazenamento e processamento de dados na nuvem permitem o monitoramento contínuo e em tempo real de parâmetros de qualidade da água e do ar em escala urbana e regional (POPESCU *et al.*, 2024). Robôs autônomos de solo para amostragem e análise *in situ*, combinando mobilidade, capacidade analítica e transmissão de dados, representam o próximo patamar da vigilância ambiental autônoma (NORBY *et al.*, 2024).

Inteligência artificial e quimiometria

A inteligência artificial (IA) e a quimiometria transformam a forma como os grandes volumes de dados gerados pelo monitoramento ambiental são tratados, interpretados e convertidos em conhecimento acionável (OLAWADE, *et al.*, 2024). Métodos quimiométricos como a Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis, PCA), a Análise de Agrupamentos Hierárquicos (Hierarchical Cluster Analysis, HCA), a Análise Discriminante



(Discriminant Analysis, DA) e a Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (Partial Least Squares Regression, PLS) são extensamente utilizados para identificar fontes de poluição, delinear gradientes espaciais de contaminação e monitorar tendências temporais em conjuntos de dados complexos (IANNONE, *et al.*, 2025). Algoritmos de aprendizado de máquina permitem construir modelos preditivos de qualidade ambiental a partir de dados históricos, antecipar eventos de contaminação e otimizar estratégias de monitoramento.

A integração de imagens de satélite, dados de drones, redes de sensores e plataformas IoT com métodos quimiométricos facilita o monitoramento em tempo real e longitudinal de ecossistemas preservados e antropogenicamente impactados (AROWOLO, *et al.*, 2024). A análise não-alvo (non-targeted analysis, NTA) e a análise por suspeita (suspect screening analysis, SSA), abordagens que utilizam espectrometria de massa de alta resolução para identificar contaminantes sem hipótese prévia, estão revolucionando a capacidade de descoberta de novos poluentes, tornando possível a detecção de substâncias nunca antes buscadas em matrizes ambientais (CANCHOLA, *et al.*, 2025).

Desafios do monitoramento ambiental contemporâneo

Apesar dos extraordinários avanços metodológicos e tecnológicos descritos nas seções anteriores, o monitoramento ambiental contemporâneo enfrenta desafios estruturais persistentes que limitam sua efetividade global. O primeiro e mais fundamental deles é a complexidade das matrizes reais: ao contrário das soluções padrão utilizadas na validação de métodos, as amostras ambientais contêm centenas de substâncias em interação, variando sazonalmente e espacialmente, com efeitos de matriz que alteram a resposta analítica e introduzem vieses sistemáticos difíceis de controlar (KADADOU *et al.*, 2024). A análise de misturas complexas e os efeitos sinérgicos, e antagonistas, entre poluentes representam fronteira científica ainda pouco explorada, uma vez que a toxicidade combinada de contaminantes pode diferir substancialmente da soma de seus efeitos individuais, como demonstrado para bisfenóis e filtros UV em combinações (KUDŁAK *et al.*, 2022).

O acesso desigual à infraestrutura laboratorial é outro desafio crítico e de dimensão ética. A maioria dos estudos sobre contaminantes emergentes concentra-se em países desenvolvidos e nas regiões mais ricas do Brasil, especialmente Sudeste e Sul, deixando populações vulneráveis em regiões de alta pressão agroindustrial, como o Centro-Oeste e o Nordeste brasileiros, sub-monitoradas e sem dados para subsidiar ações protetivas (MONTAGNER; VIDAL; ACAYABA, 2017). A democratização do acesso a tecnologias analíticas de baixo custo, como os sensores eletroquímicos em papel e os dispositivos portáteis baseados em smartphones, é apontada como caminho promissor para reduzir essa assimetria



(INOBEME *et al.*, 2024). Por fim, a integração entre os dados analíticos gerados e a tomada de decisão política permanece frágil: há um abismo persistente entre a produção científica e sua incorporação em normas, planos de manejo e ações de remediação efetivas, que exige o fortalecimento das interfaces entre ciência, governo e sociedade.

Considerações finais

A Química Analítica ocupa posição estratégica no enfrentamento da poluição ambiental contemporânea, ao possibilitar a detecção, identificação e quantificação de contaminantes presentes em diferentes matrizes ambientais, muitas vezes em concentrações imperceptíveis aos sentidos humanos. Ao transformar sinais químicos complexos em informações confiáveis e cientificamente validadas, essa área do conhecimento fornece suporte fundamental para o monitoramento ambiental, a avaliação de riscos e a formulação de políticas públicas voltadas à proteção da saúde humana e dos ecossistemas.

Os avanços observados nas últimas décadas ampliaram significativamente a capacidade analítica aplicada ao controle ambiental. Técnicas instrumentais cada vez mais sensíveis permitiram a detecção de contaminantes em níveis ultratraço, enquanto a incorporação de tecnologias como sensores portáteis, miniaturização de sistemas, biossensores, espectrometria de massas de alta resolução, inteligência artificial e quimiometria expandiu as possibilidades de monitoramento em tempo real e de interpretação de grandes volumes de dados ambientais. Paralelamente, os princípios da Química Analítica Verde vêm impulsionando o desenvolvimento de métodos mais sustentáveis, com redução do consumo de reagentes, menor geração de resíduos e maior eficiência energética.

O estudo também evidenciou que o avanço científico e tecnológico da Química Analítica ocorre em ritmo mais acelerado do que a atualização dos marcos regulatórios ambientais, especialmente diante da crescente presença de contaminantes emergentes, como PFAS, resíduos farmacêuticos, disruptores endócrinos e microplásticos. Esse descompasso representa importante desafio para os sistemas de vigilância e gestão ambiental, exigindo maior integração entre produção científica, monitoramento ambiental e formulação de políticas regulatórias.

Nesse contexto, a integração entre automação analítica, inteligência artificial, quimiometria e tecnologias sustentáveis tende a redefinir o futuro da Química Analítica Ambiental, ampliando sua capacidade de resposta frente aos desafios ambientais contemporâneos. Assim, investir no fortalecimento metodológico, tecnológico e regulatório da Química Analítica Ambiental significa ampliar a capacidade coletiva de compreender, monitorar e enfrentar os impactos da poluição sobre a saúde humana e os ecossistemas.



Referências bibliográficas

ACKERMAN GRUNFELD, D. et al. **Underestimated burden of per- and polyfluoroalkyl substances in global surface waters and groundwaters.** *Nature Geoscience*, v. 17, p. 340–346, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01402-8>. Acesso em: 27 mar. 2026.

ARMENTA, Sergio; GARRIGUES, Salvador; DE LA GUARDIA, Miguel. **Green Analytical Chemistry.** *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 27, n. 6, p. 497–511, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.05.003>. Acesso em: 30 mar. 2026.

AROWOLO, Modupe Ebunoluwa et al. **Integrating AI enhanced remote sensing technologies with IOT networks for precision environmental monitoring and predicative ecosystem management.** *World Journal of Advanced Research and Reviews*, v. 23, n. 2, p. 2156–2166, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2573>. Acesso em: 30 mar. 2026.

BAKARE-ABIDOLA, Taiwo; OLAOYE, Jelil. **Environmental policy and governance of emerging contaminants in drinking water: a comparative analysis of global regulations and remediation strategies.** *Path of Science*, v. 11, n. 4, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.22178/pos.116-18>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BOAHEN, E.; OWUSU, L.; ADJEI-ANIM, S. O. **A comprehensive review of emerging environmental contaminants of global concern.** *Discover Environment*, v. 3, art. 144, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00259-x>. Acesso em: 22 mar. 2026.

BOUNEGRU, Alexandra Virginia; IACOB, Ancața Dinu; ITICESCU, Cătălina; GEORGESCU, Puiu Lucian. **Electrochemical sensors and biosensors for the detection of pharmaceutical contaminants in natural waters: a comprehensive review.** *Chemosensors*, v. 13, n. 2, art. 65, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors13020065>. Acesso em: 28 mar. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Guia 69/2023: avaliação da neurotoxicidade associada a agrotóxicos.** Brasília: ANVISA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2024/anvisa-apresenta-guia-de-avaliacao-de-neurotoxicidade-deagrototoxicos>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RDC nº 166, de 24 de julho de 2017.** Dispõe sobre a validação de métodos analíticos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 25 jul. 2017. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2017/rdc0166_24_07_2017.pdf. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 2.726, de 22 de maio de 2023.** Institui a Política Nacional de Controle dos PFAS – substâncias perfluoroalquil e polifluoroalquil, e dá outras providências. Brasília: Câmara dos Deputados, 2023. Disponível em:



<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2358427>.

Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58–63.

Disponível

em:

https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/CONAMA_RES_CONS_2005_357.pdf.

Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em:

https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/CONAMA_RES_CONS_2009_420.pdf.

Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 maio 2011. Seção 1, p. 89. Disponível em:

https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/CONAMA_RES_CONS_2011_430.pdf.

Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 21 nov. 2018. Seção 1, p. 155–156. Disponível em:

https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/CONAMA_RES_CONS_2018_491.pdf.

Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2024. Seção 1. Disponível em:

https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827.

Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Relatórios de comercialização de agrotóxicos: boletim anual de produção, importação, exportação e vendas de agrotóxicos no Brasil – 2023**. Brasília: IBAMA, 2024. Disponível em:

<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 7 maio



2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.pdf. Acesso em: 29 mar. 2026.

CANCHOLA, Alexa et al. **Advancing non-target analysis of emerging environmental contaminants with machine learning: current status and future implications.** *Environment International*, v. 198, art. 109404, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109404>. Acesso em: 30 mar. 2026.

CHEN, Binjie et al. **An interpretable physics-informed deep learning model for estimating multiple air pollutants.** *GIScience & Remote Sensing*, v. 62, n. 1, art. 2482272, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15481603.2025.2482272>. Acesso em: 15 maio 2026.

CHRISTIAN, G. D. **Evolution of analytical sciences in the United States: a historical account.** *Annual Review of Analytical Chemistry*, v. 13, p. 475–496, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-091119-120456>. Acesso em: 23 mar. 2026.

DUCCI, L.; RIZZO, P.; PINARDI, R.; CELICO, F. **An interdisciplinary assessment of the impact of emerging contaminants on groundwater from wastewater containing disodium EDTA.** *Sustainability*, v. 16, n. 19, art. 8624, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16198624>. Acesso em: 27 mar. 2026.

ERRAJI, H. et al. **The potential of drone observations to improve air quality predictions by 4D-Var.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 24, p. 13913–13934, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-24-13913-2024>. Acesso em: 15 maio 2026.

EUROPEAN UNION. Council of the European Union. **Water pollution: Council and Parliament reach provisional deal to update priority substances in surface and ground waters.** Bruxelas, 23 set. 2025. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/09/23/water-pollution-council-and-parliament-reach-provisional-deal-to-update-priority-substances-in-surface-and-ground-waters/>. Acesso em: 15 abr. 2026.

EUROPEAN UNION. **Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.** *Official Journal of the European Union*, L 327, p. 1–73, 22 dez. 2000. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/eng>. Acesso em: 25 mar. 2026.

FARRELL, M. et al. **Ion-exchange chromatography coupled to mass spectrometry in life science, environmental, and medical research.** *Analytical Chemistry*, v. 95, n. 1, p. 218–246, 2023. Edição especial: Fundamental and Applied Reviews in Analytical Chemistry. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c04298>. Acesso em: 28 mar. 2026.

GALUSZKA, Aleksandra; MIGASZEWSKI, Zygmunt M.; KONIECZKA, Piotr; NAMIEŚNIK, Jacek. **Analytical Eco-Scale for assessing the greenness of analytical procedures.** *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 37, p. 61–72, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.03.013>. Acesso em: 30 mar. 2026.



GALUSZKA, Aleksandra; MIGASZEWSKI, Zygmunt; NAMIEŚNIK, Jacek. **The 12 principles of green analytical chemistry and the SIGNIFICANCE mnemonic of green analytical practices.** *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 50, p. 78–84, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.04.010>. Acesso em: 30 mar. 2026.

GUARDANS, R. **Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in biota, water and sediments.** *Environmental Science: Advances*, v. 3, p. 1111–1123, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4VA00023D>. Acesso em: 25 mar. 2026.

HENDERSON, A.; HEANEY, L. M.; RANKIN-TURNER, S. **Advancements in ambient ionisation mass spectrometry in 2024: an annual review.** *Analytical Science Advances*, v. 6, n. 1, art. e70007, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ansa.70007>. Acesso em: 22 mar. 2026.

HOSSAIN, M. S. et al. **Arsenic and heavy metal contamination in drinking water from an industrial zone in Dhaka District, Bangladesh.** *PLOS ONE*, v. 20, n. 10, art. e0332601, out. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0332601>. Acesso em: 28 mar. 2026.

IANNONE, Andrea et al. **Principal Component Analysis to discriminate and locate natural and anthropogenic sources of contamination within a strongly anthropized region: a technical workflow.** *Environments*, Basel, v. 12, n. 5, art. 163, maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments12050163>. Acesso em: 30 mar. 2026.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **DOQ-CGCRE-008: orientação sobre validação de métodos analíticos.** Revisão 09. Rio de Janeiro: INMETRO, 2020. 30 p. Disponível em: <https://www.gov.br/cdtn/pt-br/centrais-de-conteudo/documentos-cgcre-abnt-nbr-iso-iec-17025/doq-cgcre-008/view>. Acesso em: 29 mar. 2026.

INOBEME, Abel et al. **Chemical sensor technologies for sustainable development: recent advances, classification, and environmental monitoring.** *Advanced Sensor Research*, v. 3, n. 12, art. 2400066, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adsr.202400066>. Acesso em: 28 mar. 2026.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Nomenclature in evaluation of analytical methods including detection and quantification capabilities.** *Pure and Applied Chemistry*, v. 67, n. 10, p. 1699–1723, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/pac199567101699>. Acesso em: 23 mar. 2026.

KADADOU, D.; TIZANI, L.; ALSAFAR, H.; HASAN, S. W. **Analytical methods for determining environmental contaminants of concern in water and wastewater.** *MethodsX*, v. 12, art. 102582, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102582>. Acesso em: 22 mar. 2026.

KARAYANNIS, M. I.; EFSTATHIOU, C. E. **Significant steps in the evolution of analytical chemistry — is the today's analytical chemistry only chemistry?** *Talanta*, v. 102, p. 7–15, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.06.003>. Acesso em: 23 mar. 2026.



KAUR, R.; GARKAL, A.; SARODE, L.; BANGAR, P.; MEHTA, T.; SINGH, D. P.; RAWAL, R. **Understanding arsenic toxicity: implications for environmental exposure and human health.** *Journal of Hazardous Materials Letters*, v. 5, art. 100090, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.100090>. Acesso em: 25 mar. 2026.

KEITH, Lawrence H.; GRON, Liz U.; YOUNG, Jennifer L. **Green analytical methodologies.** *Chemical Reviews*, v. 107, n. 6, p. 2695–2708, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cr068359e>. Acesso em: 30 mar. 2026.

KHAN, Z.; ELAHI, A.; BUKHARI, D. A.; REHMAN, A. **Cadmium sources, toxicity, resistance and removal by microorganisms: a potential strategy for cadmium eradication.** *Journal of Saudi Chemical Society*, v. 26, n. 6, art. 101569, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101569>. Acesso em: 25 mar. 2026.

KUDŁAK, Błażej et al. **Enhanced toxicity of bisphenols together with UV filters in water: identification of synergy and antagonism in three-component mixtures.** *Molecules*, v. 27, n. 10, art. 3260, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules27103260>. Acesso em: 15 maio 2026.

KUMKRONG, P. et al. **Sequential Tessier extraction of 17 elements from three certified reference materials of marine sediments (HISS-1, MESS-4 and PACS-3).** *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 413, p. 1047–1057, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00216-020-03063-z>. Acesso em: 27 mar. 2026.

LIU, X. et al. **Portable Mass Spectrometry for on-site detection of hazardous volatile organic compounds via robotic extractive sampling.** *Analytical Chemistry*, v. 96, n. 23, p. 9325–9331, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c01555>. Acesso em: 30 mar. 2026.

LONG, Z.; LUO, Y.; ZHENG, C.; DENG, P.; HOU, X. **Recent advance of hydride generation–analytical atomic spectrometry: Part I — technique development.** *Applied Spectroscopy Reviews*, Philadelphia, v. 47, n. 5, p. 382–413, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/05704928.2012.666775>. Acesso em: 14 maio 2026.

MARTÍNEZ-PÉREZ-CEJUELA, H.; GIONFRIDDO, E. **Innovative sample preparation strategies for emerging pollutants in environmental samples.** *Annual Review of Analytical Chemistry*, v. 18, p. 73–95, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-071224-093709>. Acesso em: 22 mar. 2026.

MEHER, Anil Kumar; ZAROURI, Akli. **Green Analytical Chemistry: recent innovations.** *Analytica*, v. 6, n. 1, art. 10, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/analytica6010010>. Acesso em: 30 mar. 2026.

MONTAGNER, Cassiana Carolina; VIDAL, Cristiane; ACAYABA, Rafael. **Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios.** *Química Nova*, São Paulo, v. 40, n. 9, p. 1094–1110, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>. Acesso em: 14 maio 2026.



MONTEIRO, A. M. D. et al. **Revisão sistemática de técnicas analíticas para monitoramento de contaminantes emergentes.** *Brazilian Journal of Health Review*, v. 9, n. 1, art. e85009, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.34119/bjhrv9n1-032>. Acesso em: 28 mar. 2026.

MUSADIS, C. A.; SILVEIRA, S. **Metais pesados e seus efeitos na saúde humana: revisão de literatura.** *Revista FT*, 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/metais-pesados-e-seus-efeitos-na-saude-humana-revisao-de-literatura/>. Acesso em: 25 mar. 2026.

MUTLAG, Farah et al. **Smart sensors and artificial intelligence: sustainable solutions for environmental pollution challenges.** *Next Research*, v. 4, art. 101195, fev. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101195>. Acesso em: 30 mar. 2026.

NORBY, Joe et al. **Path to autonomous soil sampling and analysis by ground-based robots.** *Journal of Environmental Management*, v. 365, art. 121162, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121162>. Acesso em: 30 mar. 2026.

OLAWADE, David B. et al. **Artificial intelligence in environmental monitoring: advancements, challenges, and future directions.** *Hygiene and Environmental Health Advances*, v. 12, art. 100114, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114>. Acesso em: 30 mar. 2026.

PAN, L. et al. **3D-printed electrodes for electrochemical detection of environmental analytes.** *Analytical Methods*, v. 17, n. 10, p. 2235–2253, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4AY02271H>. Acesso em: 30 mar. 2026.

PENA-PEREIRA, Francisco; WOJNOWSKI, Wojciech; TOBISZEWSKI, Marek. **AGREE – Analytical GREENness Metric Approach and Software.** *Analytical Chemistry*, v. 92, n. 14, p. 10076–10082, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01887>. Acesso em: 30 mar. 2026.

PŁOTKA-WASYLKA, Justyna. **A new tool for the evaluation of the analytical procedure: Green Analytical Procedure Index.** *Talanta*, v. 181, p. 204–209, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.01.013>. Acesso em: 30 mar. 2026.

POPESCU, S. M. et al. **Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management.** *Frontiers in Environmental Science*, v. 12, art. 1336088, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1336088>. Acesso em: 30 mar. 2026.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Tipos de poluição.** [s. d.]. Disponível em: <https://www.unep.org/beatpollution/forms-pollution/air>. Acesso em: 25 mar. 2026.

RAHMAN, Md Minhazur et al. **Enhancing IoT-based environmental monitoring and power forecasting: a comparative analysis of AI models for real-time applications.** *Applied Sciences*, v. 14, n. 24, art. 11970, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app142411970>. Acesso em: 30 mar. 2026.



SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Princípios de Análise Instrumental**. Tradução de Élson Longo et al. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de Química Analítica**. Tradução de Marco Antonio Guimarães Jardim e Flávia Roberta Prado Moraes. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency (EPA). **EPA announces it will keep maximum contaminant levels for PFOA, PFOS**. Washington: EPA, maio 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-announces-it-will-keep-maximum-contaminant-levels-pfoa-pfos>. Acesso em: 29 mar. 2026.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency (EPA). **PFAS National Primary Drinking Water Regulation**. Washington: EPA, 2024. 89 Fed. Reg. 32532. Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2024/04/26/2024-07773/pfas-national-primary-drinking-water-regulation>. Acesso em: 29 mar. 2026.

VONGELIS, P.; KOULOURIS, N. G.; BAKAKOS, P.; ROVINA, N. **Air pollution and effects of tropospheric ozone (O₃) on public health**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 22, n. 5, art. 709, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph22050709>. Acesso em: 25 mar. 2026.

WANG, F. et al. **Emerging contaminants: a One Health perspective**. *The Innovation*, v. 5, n. 4, art. 100612, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100612>. Acesso em: 29 mar. 2026.

WOJNOWSKI, Wojciech; TOBISZEWSKI, Marek; PENA-PEREIRA, Francisco; PSILLAKIS, Eleftheria. **AGREeprep – Analytical greenness metric for sample preparation**. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 149, art. 116553, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116553>. Acesso em: 30 mar. 2026.

ZHANG, Jianfeng; ZHOU, Zhen; HU, Bin. **Onsite environmental analysis by portable mass spectrometry**. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 193, art. 118461, set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118461>. Acesso em: 30 mar. 2026.

ZHAO, Xiaoli et al. **Time to strengthen the governance of new contaminants in the environment**. *Nature Communications*, v. 16, art. 7775, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63217-4>. Acesso em: 29 mar. 2026.

ZHENG, C.; LI, Y.; HE, Y.; MA, Q.; HOU, X. **Photo-induced chemical vapor generation with formic acid for ultrasensitive atomic fluorescence spectrometric determination of mercury: potential application to mercury speciation in water**. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Cambridge, v. 20, n. 8, p. 746–750, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/b503727a>. Acesso em: 14 maio 2026.

