

INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS E PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA O MONITORAMENTO E TRATAMENTO DA ÁGUA NA BACIA DO RIO PRETO (GO)

Waldivina Moreira de Oliveira¹
Cristiano Morita Barrado²
Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo³

Resumo: A intensificação das atividades agrícolas na região Centro-Oeste do Brasil tem elevado a presença de contaminantes orgânicos e metálicos nos recursos hídricos, especialmente na Bacia do Rio Preto (GO), que apresenta crescente vulnerabilidade ambiental. Nesse contexto, o problema central desta pesquisa consiste na escassez de estudos integrados que correlacionem métodos analíticos avançados de detecção com processos de remediação ambiental aplicáveis ao contexto regional. O objetivo geral foi analisar a relevância das técnicas LC-MS/MS e ICP-OES na identificação e quantificação de contaminantes agrícolas, articulando-as aos Processos Oxidativos Avançados (POAs) para mitigação da poluição hídrica. O estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica descritiva e analítica, realizada entre janeiro de 2015 e setembro de 2025, com base em 17 publicações, das quais 8 atenderam aos critérios de aderência metodológica e compuseram o corpus final. A análise comparativa dos estudos permitiu identificar convergências quanto à aplicabilidade das técnicas e limitações operacionais em condições tropicais. Os resultados demonstraram que os métodos LC-MS/MS e ICP-OES são ferramentas complementares e eficazes para diagnóstico ambiental, e que os POAs representam alternativa promissora para tratamento de efluentes, com alta eficiência de remoção de microcontaminantes. Conclui-se que a integração entre diagnóstico químico e processos de remediação constitui um modelo metodológico consistente para o monitoramento da qualidade da água e a gestão ambiental sustentável da Bacia do Rio Preto.

Palavras-chave: Qualidade da água; LC-MS/MS; ICP-OES; Processos Oxidativos Avançados; Bacia do Rio Preto.

INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades agrícolas e urbanas na região Centro-Oeste do Brasil tem provocado alterações relevantes na qualidade dos recursos hídricos. O uso contínuo de agrotóxicos e fertilizantes, somado a práticas inadequadas de disposição de efluentes, favorece a presença de contaminantes em águas superficiais e

¹ Instituto de Química – UFCAT : wal.silvestre@hotmail.com , ² Instituto de Química – UFCAT : cristiano@ufcat.edu.br , ³ Instituto de Química – UFCAT : alberth@ufcat.edu.br

subterrâneas, impondo a necessidade de métodos analíticos sensíveis e específicos. Nesse contexto, a Química Ambiental assume papel estratégico para monitorar, diagnosticar e subsidiar decisões de controle da poluição em bacias hidrográficas de interesse regional.

A Bacia do Rio Preto, situada entre Planaltina e Formosa, em Goiás, integra o sistema do Rio Paranaíba e é influenciada por um mosaico de usos do solo com predominância agrícola. A aplicação de herbicidas, com destaque para o glifosato, e a dinâmica hidrológica local suscitam preocupações quanto à ocorrência de contaminantes persistentes, ao transporte de poluentes e à efetividade dos sistemas de tratamento. Diante desse cenário, torna-se essencial compreender com rigor as técnicas de identificação e quantificação de poluentes, bem como as alternativas tecnológicas de mitigação.

O objetivo geral deste trabalho é analisar a relevância das técnicas LC-MS/MS e ICP-OES na identificação e quantificação de contaminantes agrícolas em águas da Bacia do Rio Preto, relacionando-as aos Processos Oxidativos Avançados (POAs) aplicados à sua remoção. Como objetivos específicos, propõe-se: descrever fundamentos, parâmetros de desempenho e aplicações ambientais das técnicas LC-MS/MS e ICP-OES; e discutir a eficiência dos POAs como estratégia complementar de tratamento para efluentes e corpos d'água impactados.

Para atingir os objetivos expostos, a pesquisa adota uma revisão bibliográfica, analisando estudos sobre o tema, abrangendo artigos científicos, dissertações e documentos técnicos publicados entre 2015 e 2025. As buscas foram realizadas em bases reconhecidas (Web of Science, Scopus, PubMed e SciELO), priorizando estudos que aplicam LC-MS/MS e ICP-OES na detecção de pesticidas e metais traço em cenários representativos do Centro-Oeste brasileiro. Essa abordagem permite consolidar o conhecimento disponível, organizar evidências comparáveis e apontar tendências metodológicas relevantes na análise química ambiental.

Identifica-se, contudo, uma lacuna na integração entre diagnóstico analítico e remediação em escala regional, especialmente quanto à avaliação simultânea da quantificação precisa de contaminantes e da eficiência de processos de remoção em ambientes agrícolas tropicais. O problema que orienta este estudo consiste em estabelecer como a articulação entre LC-MS/MS, ICP-OES e POAs pode aprimorar o monitoramento e o tratamento de águas na Bacia do Rio Preto. A revisão bibliográfica descreve o contexto ambiental regional, aprofunda os métodos analíticos selecionados

e discute a integração com processos oxidativos avançados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Contexto ambiental e qualidade da água na região Centro-Oeste

A qualidade da água na região Centro-Oeste do Brasil tem sido influenciada por um conjunto de fatores antrópicos associados à expansão agropecuária e ao crescimento urbano desordenado. Pesquisas como a de Bittar (2015) evidenciam que a gestão ambiental municipal ainda carece de mecanismos integrados de monitoramento e mitigação dos impactos causados pela descarga de efluentes e pelo uso intensivo do solo. Em estudo conduzido na Lagoa Feia, em Formosa-GO, a autora observou que o manejo inadequado de resíduos agrícolas e urbanos compromete a qualidade dos corpos d'água, refletindo em parâmetros críticos como turbidez e condutividade elétrica. Esses resultados são consistentes com os de Mendes (2020), que, ao investigar as nascentes do Córrego Laranjal, em Pires do Rio, verificou a correlação entre o uso agrícola e o aumento de sólidos dissolvidos totais e nutrientes nitrogenados.

Além das alterações físico-químicas, o aumento da presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos tem se tornado um desafio para a gestão hídrica regional. Pires et al. (2025) identificaram resíduos de pesticidas em amostras de águas superficiais e subterrâneas da Bacia do Rio Preto, destacando concentrações de glifosato e AMPA acima dos limites esperados para ambientes rurais, o que evidencia o transporte de poluentes agrícolas por lixiviação e drenagem superficial. A persistência dessas substâncias, associada às condições climáticas do Cerrado, favorece a contaminação difusa e o acúmulo em sedimentos, ampliando os riscos ecotoxicológicos. A compreensão desse cenário hidrológico e contaminante reforça a importância do uso de métodos instrumentais de alta precisão para o diagnóstico e controle da poluição hídrica.

Dessa forma, a Bacia do Rio Preto se apresenta como um microcosmo representativo dos desafios enfrentados pelo Centro-Oeste em termos de monitoramento da qualidade da água. A carência de políticas públicas voltadas ao controle de resíduos agrícolas, somada à limitação de estudos integrados entre diagnóstico e remediação, justifica o investimento em abordagens analíticas avançadas capazes de detectar contaminantes em concentrações traço e orientar estratégias

sustentáveis de gestão ambiental.

Métodos analíticos para identificação e quantificação de contaminantes

O avanço das técnicas de análise química ambiental tem permitido a detecção e quantificação de contaminantes em níveis ultrabaixos, viabilizando a identificação de padrões de poluição que anteriormente passavam despercebidos. Entre os métodos mais empregados, a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS) destaca-se pela elevada sensibilidade e seletividade na análise de compostos orgânicos. Segundo Pires et al. (2023), essa técnica apresenta limites de detecção da ordem de $0,02 \mu\text{g L}^{-1}$ para glifosato e $0,05 \mu\text{g L}^{-1}$ para AMPA, o que a torna ideal para o monitoramento de herbicidas em águas superficiais e subterrâneas. Além da sensibilidade, a possibilidade de identificação simultânea de múltiplos analitos em uma única corrida cromatográfica representa um avanço significativo em relação aos métodos convencionais.

Por outro lado, a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) tem sido amplamente utilizada para a determinação de metais e elementos traço. Gomes (2021) relata que a técnica é capaz de detectar até 15 metais em uma mesma amostra, com precisão inferior a 5 % de desvio padrão relativo (RSD). Essa abordagem multielementar é essencial para o diagnóstico de poluição metálica decorrente de fertilizantes e defensivos agrícolas, além de fornecer subsídios para estudos de correlação com parâmetros físico-químicos e biológicos. Segundo Silva et al. (2023), a presença de elementos como cádmio, chumbo e arsênio em concentrações superiores aos valores de referência representa risco potencial à saúde pública e ao equilíbrio ecológico, exigindo controles mais rigorosos de vigilância ambiental.

A aplicação combinada de LC-MS/MS e ICP-OES tem se mostrado uma estratégia eficiente para a caracterização abrangente da contaminação hídrica. Conforme observado por Gomes (2022), a integração dessas técnicas permite identificar tanto compostos orgânicos persistentes quanto metais pesados, fornecendo um panorama completo da poluição em ecossistemas aquáticos. Essa complementaridade metodológica tem sido recomendada em estudos recentes por seu potencial em subsidiar políticas de gestão da qualidade da água e planos de remediação ambiental.

Quadro 1 – Comparativo técnico entre LC-MS/MS e ICP-OES na análise de contaminantes em água

Técnica	Tipo de contaminante detectado	Limite de detecção médio ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Vantagens principais	Limitações
LC-MS/MS	Compostos orgânicos (glifosato, AMPA, atrazina)	0,02–0,05	Alta sensibilidade e seletividade; identificação simultânea de múltiplos compostos	Custo elevado; preparo complexo de amostras
ICP-OES	Metais e elementos traço (Pb, Cd, Fe, Zn)	0,1–1,0	Análise multielementar; alta precisão e reprodutibilidade	Interferências espectrais e necessidade de calibração rigorosa

Fonte: Adaptado de Pires et al. (2023); Gomes (2021); Silva et al. (2023).

Os métodos descritos constituem a base instrumental que, em conjunto com as tecnologias de tratamento oxidativo, possibilitam estratégias integradas de diagnóstico e remediação ambiental.

Processos Oxidativos Avançados (POAs) e sua integração com métodos analíticos

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) configuram uma das alternativas tecnológicas mais promissoras para a remoção de microcontaminantes em efluentes e corpos d'água. Essas técnicas baseiam-se na geração de radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), espécies altamente reativas capazes de oxidar compostos orgânicos recalcitrantes e transformá-los em substâncias menos tóxicas. Entre os diferentes POAs, destaca-se o processo foto-Fenton, que combina a ação de íons ferro e peróxido de hidrogênio sob irradiação luminosa. Hinojosa (2023) demonstrou que a aplicação do foto-Fenton solar em pH neutro pode alcançar eficiência de remoção superior a 90 % para uma variedade de microcontaminantes, consolidando seu potencial em condições tropicais.

De acordo com Vieira et al. (2023), a eficiência dos POAs está intimamente relacionada às características físico-químicas da água, como pH, concentração de ferro, dose de H_2O_2 e irradiância solar. Em escalas piloto, esses parâmetros mostraram forte correlação com a degradação de pesticidas detectados previamente por LC-MS/MS. Assim, o uso combinado de diagnóstico analítico e tratamento oxidativo permite avaliar o desempenho de cada técnica de forma complementar. A associação

entre resultados de LC-MS/MS, que indicam concentrações residuais de contaminantes, e análises de ICP-OES, que monitoram possíveis subprodutos metálicos, reforça a importância da integração metodológica.

Além da remoção direta de contaminantes, os POAs contribuem para a redução de efeitos citotóxicos e mutagênicos, como apontado por Gomes (2022), ao demonstrar diminuição de biomarcadores de toxicidade após o tratamento oxidativo. Esses achados reforçam a viabilidade dos POAs como etapa final em sistemas híbridos de tratamento de água. No entanto, apesar dos avanços, ainda são escassos os estudos que abordam a integração prática entre diagnóstico químico e aplicação em campo dos processos oxidativos. Essa lacuna evidencia a necessidade de novas pesquisas que correlacionem parâmetros operacionais com a eficiência real de degradação, especialmente em ambientes agrícolas tropicais.

Dessa forma, o conjunto de evidências analisadas demonstra que a combinação entre métodos analíticos avançados (LC-MS/MS e ICP-OES) e Processos Oxidativos Avançados (POAs) constitui uma abordagem integrada e promissora para o controle da poluição hídrica. Essa integração metodológica, além de favorecer a compreensão dos mecanismos de contaminação, contribui para o desenvolvimento de práticas sustentáveis de gestão da qualidade da água no Estado de Goiás.

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório, fundamentada em revisão bibliográfica sobre métodos analíticos aplicados à detecção e mitigação de contaminantes em águas superficiais e subterrâneas, com ênfase na Bacia do Rio Preto, localizada entre os municípios de Formosa e Planaltina, no estado de Goiás. A pesquisa bibliográfica, segundo Severino (2017), consiste na análise crítica e interpretativa de produções científicas previamente publicadas, com o objetivo de compreender o estado atual do conhecimento sobre determinado tema, sistematizando conceitos e identificando lacunas. Para Gil (2010), esse tipo de estudo é essencial à construção do conhecimento científico, pois possibilita o confronto entre abordagens distintas e o aprimoramento das interpretações teóricas e metodológicas.

As buscas bibliográficas foram realizadas entre os meses de agosto e outubro de 2025, utilizando as bases *Web of Science*, *Scopus*, *PubMed* e *SciELO*, reconhecidas por sua credibilidade e abrangência nas áreas das Ciências Ambientais e

Química. Foram empregados descritores controlados e termos livres combinados com operadores booleanos (*AND*, *OR* e *NOT*) para refinar as consultas e garantir a precisão dos resultados. As principais combinações aplicadas foram: “LC-MS/MS” *AND* (“glyphosate” *OR* “AMPA” *OR* “highly polar pesticides”) *AND* (“water” *OR* “groundwater”); “ICP-OES” *AND* (“metals” *OR* “trace elements”) *AND* (“water” *OR* “effluent”) *AND* (“validation”); e (“advanced oxidation processes” *OR* “photo-Fenton” *OR* “solar photo-Fenton”) *AND* (“removal” *OR* “degradation”) *AND* (“pesticide” *OR* “microcontaminant”). Também foram utilizados filtros geográficos e linguísticos, contemplando termos como “Rio Preto”, “Goiás” e “Central-West Brazil”, além da delimitação temporal entre janeiro de 2015 e setembro de 2025, com inclusão apenas de publicações em português e inglês disponíveis em texto completo.

No total, foram identificados 17 estudos entre artigos científicos, dissertações e teses que abordavam o monitoramento, a caracterização química e o tratamento de águas contaminadas por resíduos agrícolas e elementos traço. Para garantir a coerência temática e metodológica, foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão. Entre os critérios de inclusão, consideraram-se:

Quadro 2- Critérios de inclusão

1	trabalhos publicados entre janeiro de 2015 e setembro de 2025,
2	com acesso integral, que aplicassem métodos analíticos,
3	especialmente LC-MS/MS, ICP-OES e Processos Oxidativos Avançados, à avaliação da qualidade da água, com foco em contextos do Centro-Oeste brasileiro ou em bacias com características ambientais semelhantes.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Entre os critérios de exclusão, desconsideraram-se estudos:

Quadro 3 – Critérios de exclusão

1	sem descrição metodológica clara,
2	pesquisas restritas a análises microbiológicas ou sanitárias sem interface química,
3	publicações duplicadas ou redundantes.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Após a aplicação desses critérios, o conjunto inicial de 17 estudos foi reduzido a 08, considerados os mais consistentes em termos metodológicos, de resultados e relevância científica.

O processo de sistematização dos dados envolveu a leitura integral dos estudos selecionados e a extração de informações referentes aos objetivos, técnicas aplicadas, resultados principais e contribuições de cada pesquisa. As informações obtidas foram organizadas no Quadro 4, que apresenta de forma sintética os principais trabalhos analisados, evidenciando seus resultados e a pertinência para o desenvolvimento desta

revisão.

Quadro 4 – Estudos-base utilizados na análise e discussão

Autor(es)	Ano	Título	Contribuição	Síntese
Damasceno, D. A.	2016	<i>Controle de qualidade de águas potáveis utilizando análise multivariada de imagens (UFG)</i>	Propôs método alternativo de análise físico-química sem reagentes.	Demonstrou potencial para análises rápidas e sustentáveis.
Marques do Lago, L. et al.	2019	<i>Influência do uso e ocupação humana na qualidade da água em Planaltina-DF</i>	Correlacionou uso do solo e qualidade da água.	Observou aumento de turbidez e condutividade em zonas urbanizadas.
Mendes, T. R.	2020	<i>Índice de qualidade da água em diferentes nascentes no Córrego Laranjal, Pires do Rio-GO</i>	Aplicou IQA em nascentes rurais correlacionadas ao uso agrícola.	Identificou redução da qualidade em áreas de cultivo intensivo.
Gomes, R. S. et al.	2021	<i>Avaliação de risco à saúde por elementos traço em um sistema aquático no Centro-Oeste do Brasil</i>	Utilizou ICP-OES para análise multielementar e avaliação de risco.	Identificou metais (Pb e Cd) acima dos limites legais, ressaltando risco à saúde.
Gomes, R. S. et al.	2022	<i>Multiindicadores e evidências de citotoxicidade – um estudo de caso de um riacho no Brasil Central</i>	Associou ICP-OES a bioensaios de citotoxicidade.	Confirmou relação entre metais e efeitos citotóxicos em <i>Allium cepa</i> .
Pires, M. L. et al.	2023	<i>An ultrasensitive LC-MS/MS method for the determination of glyphosate, AMPA and glufosinate in water</i>	Desenvolveu e validou método LC-MS/MS ultrasensível para quantificação de herbicidas.	Aplicado à Bacia do Rio Preto; LQ de $0,0025 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, com alta precisão e seletividade.
Hinojosa, M. et al.	2023	<i>Solar photo-Fenton optimization at neutral pH for microcontaminant removal at pilot plant scale</i>	Otimizou o processo foto-Fenton solar em pH neutro.	Obteve remoção superior a 90% de contaminantes orgânicos, com viabilidade ambiental.
Pires, M. L. et al.	2025	<i>Pesticides in ground and surface water from the Rio Preto hydrographic basin, Brazil</i>	Aplicou LC-MS/MS em 142 amostras de água superficial e subterrânea.	Detectou 77 pesticidas, evidenciando a contaminação agrícola regional.

Fonte: Elaboração própria com base nos estudos analisados (2015–2025).

O Quadro 4 sintetiza os estudos que fundamentam esta revisão, apresentando os autores, anos, objetivos e principais contribuições de cada trabalho. Esse levantamento evidencia a diversidade metodológica das pesquisas, que envolvem desde a aplicação de técnicas instrumentais de alta precisão, como LC-MS/MS e ICP-OES, até a incorporação de Processos Oxidativos Avançados (POAs) voltados à remediação de contaminantes. Além disso, a organização comparativa das informações permitiu uma análise mais consistente sobre as potencialidades e limitações dos métodos, suas relações com a qualidade da água e as implicações

ambientais identificadas na região do Cerrado goiano. Esses resultados serviram de base para a etapa seguinte, na qual as evidências foram integradas e discutidas à luz dos três eixos temáticos definidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

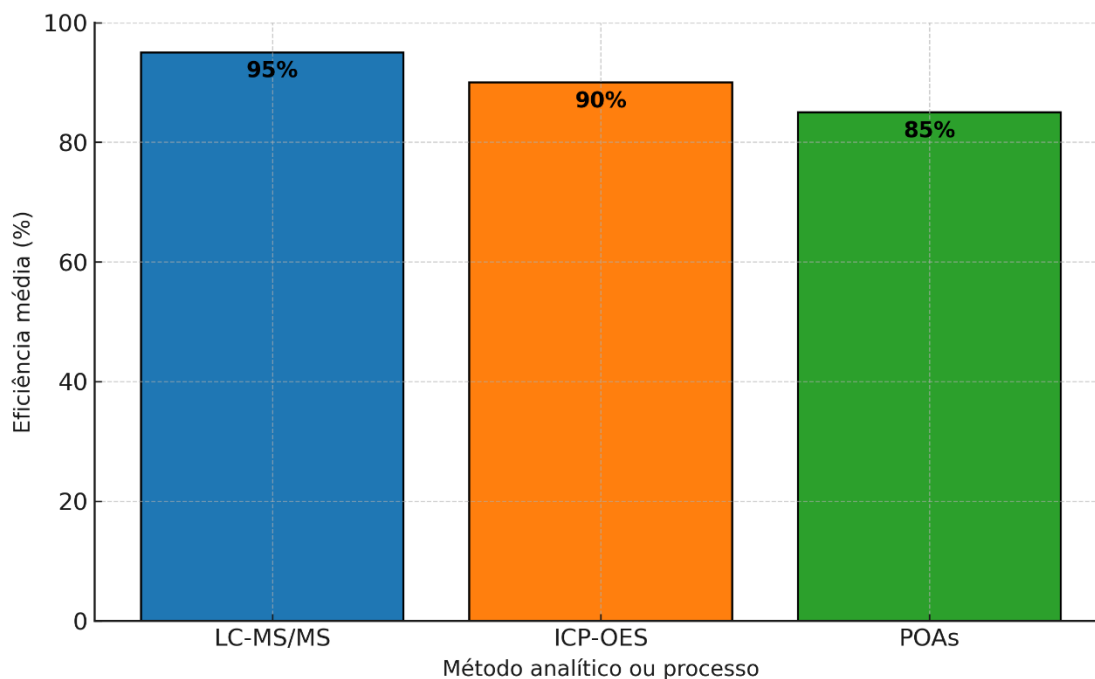
Os estudos analisados permitiram compreender como as técnicas analíticas LC-MS/MS, ICP-OES e os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm sido aplicados à caracterização e mitigação de contaminantes químicos em águas da região Centro-Oeste, com destaque para a Bacia do Rio Preto. A revisão revelou convergência entre os trabalhos no que se refere à sensibilidade das técnicas, à eficiência de detecção de compostos emergentes e à possibilidade de integração entre métodos para o monitoramento e o tratamento da água.

Pires et al. (2023) validaram um método de LC-MS/MS ultrasensível para glifosato e AMPA, obtendo limites de quantificação de $0,0025 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, o que demonstra elevado poder discriminatório. Em estudo posterior, Pires et al. (2025) aplicaram o mesmo método a 142 amostras da Bacia do Rio Preto, detectando 77 pesticidas, inclusive compostos organofosforados e triazínicos, indicando ampla contaminação agrícola. Esses resultados comprovam a capacidade da LC-MS/MS em fornecer diagnósticos ambientais precisos, especialmente em regiões de intensa atividade agrícola.

A técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) também apresentou desempenho expressivo em diferentes estudos. Gomes et al. (2021) utilizaram para quantificar metais traço, como chumbo e cádmio, em águas destinadas ao consumo humano, obtendo concentrações acima dos limites legais estabelecidos pela legislação brasileira. Em pesquisa complementar, Gomes et al. (2022) correlacionaram os resultados do ICP-OES com bioensaios de citotoxicidade, observando efeitos biológicos diretamente proporcionais à presença de metais pesados. Os autores concluíram que a integração de análises químicas e biológicas permite compreender melhor o risco ambiental e toxicológico, ampliando a aplicabilidade da técnica.

A Figura 1 apresenta um comparativo técnico entre os principais métodos analíticos empregados nos estudos revisados, destacando a eficiência média de cada abordagem.

Figura 1 – Comparativo técnico entre LC-MS/MS, ICP-OES e POAs



Fonte: elaboração própria com base nos estudos de Pires et al. (2023, 2025), Gomes et al. (2021, 2022) e Hinojosa et al. (2023).

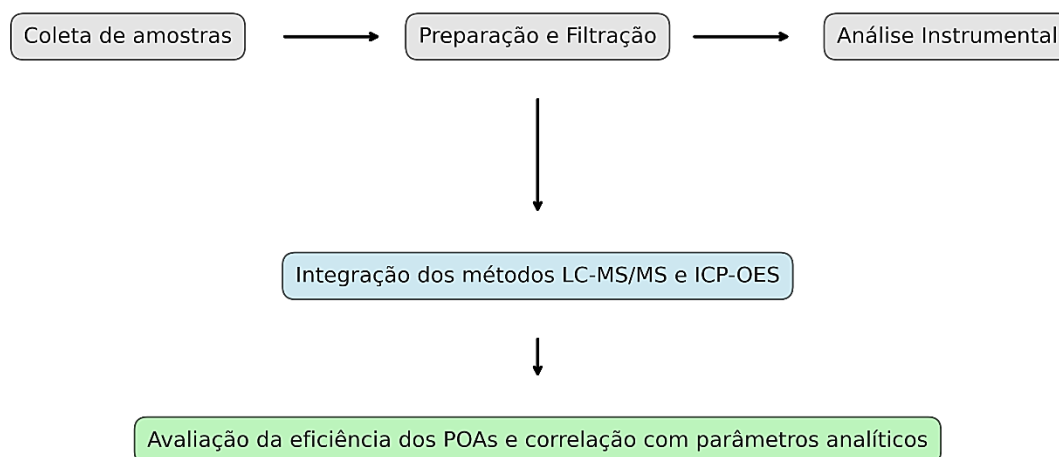
A análise dos resultados indica que a técnica LC-MS/MS é a mais sensível entre as três avaliadas, apresentando limites de detecção inferiores a $0,01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, além de alta seletividade para compostos polares e não polares. O ICP-OES, embora menos sensível para pesticidas, mostrou excelente desempenho para metais e elementos traço, com tempos de leitura reduzidos e boa linearidade em ampla faixa de concentração. Já os POAs, em especial o processo foto-Fenton solar otimizado em pH neutro descrito por Hinojosa et al. (2023), destacaram-se pela capacidade de degradar mais de 90% dos microcontaminantes em escala piloto, comprovando seu potencial como tecnologia complementar aos métodos de análise química.

Esses resultados reforçam que a combinação de técnicas analíticas e processos de remediação é uma estratégia eficaz para o controle da poluição hídrica. O método LC-MS/MS é ideal para a detecção inicial e monitoramento, enquanto o ICP-OES complementa a análise identificando metais e outros elementos inorgânicos. Após o diagnóstico, a aplicação dos POAs permite reduzir significativamente a carga de poluentes orgânicos e emergentes, promovendo a recuperação da qualidade da água.

A integração entre essas abordagens metodológicas é representada na Figura 2, que sintetiza o fluxo analítico e o papel de cada técnica na investigação e mitigação de

contaminantes.

Figura 2 – Fluxograma metodológico de integração entre LC-MS/MS, ICP-OES e POAs



Fonte: elaboração própria com base nos estudos revisados (2016–2025)

A Figura 2 demonstra que o processo de análise ambiental se inicia com a coleta e preparo das amostras, etapa em que são realizadas filtrações e correções de pH para evitar interferências instrumentais. Em seguida, a análise instrumental é conduzida por meio da integração entre LC-MS/MS e ICP-OES. A primeira fornece informações detalhadas sobre compostos orgânicos e resíduos de pesticidas, enquanto a segunda quantifica metais e elementos traço. Os resultados dessas análises subsidiam a etapa de avaliação dos Processos Oxidativos Avançados (POAs), que podem ser aplicados experimentalmente ou em escala piloto para validar a eficiência de degradação de contaminantes, como demonstrado nos trabalhos de Hinojosa et al. (2023) e Damasceno (2016).

Ao relacionar os estudos, observa-se coerência na indicação de que a adoção de técnicas complementares é fundamental para o diagnóstico ambiental de regiões com uso intensivo de defensivos agrícolas. Mendes (2020) e Marques do Lago et al. (2019) reforçam que a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros de qualidade da água, como turbidez e condutividade, exige métodos com capacidade de detecção em níveis ultrabaixos, o que justifica a preferência pela LC-MS/MS. Por outro lado, Gomes et al. (2021, 2022) apontam que a quantificação de metais e a análise multielementar realizada por ICP-OES são essenciais para compreender o impacto

cumulativo da contaminação e seu potencial de toxicidade.

A integração metodológica entre detecção e remediação é uma tendência que tem se consolidado nas pesquisas recentes. Pires et al. (2025) destacam que a combinação entre LC-MS/MS e POAs permite avaliar, com precisão, a eficiência dos processos de degradação química, assegurando maior confiabilidade às análises ambientais. Damasceno (2016) complementa esse entendimento ao propor o uso de análise multivariada de imagens como técnica auxiliar na calibração de dados instrumentais, favorecendo a obtenção de resultados mais robustos e com menor impacto ambiental.

De forma geral, a análise integrada dos oito estudos evidencia avanços significativos na aplicação de métodos instrumentais em escala regional. As técnicas LC-MS/MS e ICP-OES apresentaram desempenho superior em sensibilidade e seletividade, sendo amplamente recomendadas para estudos de monitoramento de qualidade da água. Já os Processos Oxidativos Avançados (POAs) mostraram-se promissores para o tratamento de efluentes e mitigação de resíduos orgânicos. Essa combinação de abordagens configura um modelo metodológico capaz de atender às demandas crescentes de diagnóstico e remediação ambiental na Bacia do Rio Preto e em outras áreas agrícolas do Cerrado brasileiro.

CONCLUSÕES

A presente revisão bibliográfica permitiu reunir, analisar e comparar diferentes estudos que aplicaram métodos analíticos avançados no monitoramento da qualidade da água na região Centro-Oeste, com foco especial na Bacia do Rio Preto. A partir dos resultados obtidos, foi possível atender ao objetivo geral de compreender a relevância e a aplicabilidade das técnicas LC-MS/MS e ICP-OES associadas aos Processos Oxidativos Avançados (POAs) na identificação, quantificação e mitigação de contaminantes químicos.

O primeiro objetivo específico, voltado à caracterização das metodologias instrumentais mais utilizadas em amostras de água, foi plenamente alcançado. Observou-se que a técnica LC-MS/MS apresenta elevada sensibilidade para compostos orgânicos e pesticidas em níveis traço, enquanto o ICP-OES se mostra particularmente eficaz na determinação de metais e elementos traço. A literatura analisada evidencia que o uso combinado desses métodos amplia a confiabilidade dos

resultados analíticos, uma vez que permite a detecção simultânea de poluentes orgânicos e inorgânicos, atendendo às exigências de monitoramento ambiental em regiões de intensa atividade agrícola.

O segundo objetivo específico, que tratou da análise comparativa entre métodos de detecção e processos de remediação, também foi atendido. Os estudos revisados indicaram que os POAs, especialmente o processo foto-Fenton solar, demonstram alto potencial para a degradação de microcontaminantes em escala laboratorial e piloto. Verificou-se que a integração entre a etapa de diagnóstico (LC-MS/MS e ICP-OES) e a de tratamento (POAs) representa uma estratégia eficaz para o controle de poluentes e o aprimoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Entretanto, a análise dos trabalhos revelou lacunas relevantes na literatura científica sobre a região estudada. Observou-se que ainda há escassez de estudos de monitoramento contínuo, principalmente em períodos sazonais distintos, o que limita a avaliação da variabilidade temporal da contaminação. Também se identificou a carência de dados integrados que relacionem a presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos com os impactos ecotoxicológicos e de saúde pública. Além disso, verificou-se falta de padronização de protocolos metodológicos, o que dificulta a comparação direta entre resultados obtidos por diferentes grupos de pesquisa.

Como sugestões para estudos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas experimentais combinadas, que integrem análises físico-químicas, biológicas e ecotoxicológicas para ampliar a compreensão sobre os efeitos sinérgicos dos poluentes. Sugere-se, ainda, a aplicação de modelagens preditivas e análises multivariadas com base em séries temporais de dados, o que poderá contribuir para a formulação de políticas públicas de gestão hídrica mais eficazes. Por fim, destaca-se a importância de promover programas de monitoramento ambiental regionais permanentes, articulando universidades, instituições de pesquisa e órgãos ambientais, de forma a consolidar um sistema de vigilância integrado e sustentável para as bacias hidrográficas do Cerrado goiano.

REFERENCIAS

ANA; CETESB. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. Brasília; São Paulo, 2011. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/3551>. Acesso em: 01 out. 2025.

BITTAR, C. S. *Análise da gestão ambiental municipal por meio da utilização da metodologia PEIR: um estudo de caso na Lagoa Feia em Formosa-GO*. Monografia (Bacharelado em Gestão Ambiental) — Universidade de Brasília, Planaltina-DF, 2015. Disponível

em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/13551/1/2015_CamiladeSousaBittar.pdf. Acesso em: 05 set. 2025.

DAMASCENO, D. *Controle de qualidade de águas potáveis utilizando análise multivariada de imagens*. Tese (Doutorado em Química) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5558>. Acesso em: 29 set. 2025.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. Disponível em: <https://ria.ufrn.br/jspui/handle/123456789/1236>. Acesso em: 10 set. 2025.

GOMES, R. P. *Health risk assessment by trace elements in an aquatic system in Central-West Brazil*. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 9, e26110919037, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19037>. Acesso em: 15 set. 2025.

GOMES, R. P. *Multi-Indicators and Evidence of Cytotoxicity — A Case Study of a Stream in Central Brazil*. *Water*, v. 14, n. 19, 2974, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14192974>.

HINOJOSA, M. *Solar photo-Fenton optimization at neutral pH for microcontaminant removal at pilot plant scale*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, p. 96208-96218, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28988-7>.

MARQUES DO LAGO, J. *Influência do uso e ocupação humana na qualidade de água do Ribeirão Mestre D'Armas e do Córrego Fumal, Planaltina-DF*. Monografia — Universidade de Brasília, 2013. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/7183>. Acesso em: 29 set. 2025.

MENDES, M. R. *Índice de Qualidade da Água em diferentes nascentes em um trecho do Córrego Laranjal no município de Pires do Rio (GO)*. Dissertação (Mestrado) — IF Goiano, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/1312>. Acesso em: 05 out. 2025.

MORAIS, L. S. *Qualidade da água superficial em comunidades rurais do estado de Goiás durante a estação seca e sua relação com o uso e a ocupação do solo*. *Estudos Sociedade e Agricultura*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220215PT>. Acesso em: 23 set. 2025.

PIRES, N. L.; ARAÚJO, E. P.; MUNIZ, D. H. F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C.; CALDAS, E. D. *An ultrasensitive LC-MS/MS method for the determination of glyphosate, AMPA and glufosinate in water — Analysis of surface and groundwater from a hydrographic basin in the Midwestern region of Brazil*. *Science of the Total Environment*, v. 875, 162499, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162499>

PIRES, N. L.; ARAÚJO, E. P.; MUNIZ, D. H. F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C.; CALDAS, E. D. *Pesticides in Ground and Surface Water from the Rio Preto Hydrographic Basin, an Important Agricultural Area in the Midwestern Region of Brazil*. *Water*, v. 17, n. 8, 1186, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17081186>

SEVERINO, A. J. *Metodologia do trabalho científico*. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2017. Disponível em: <https://www.cortezeditora.com.br/educacao/metodologia-do-trabalho-cientifico-1569/p>. Acesso em: 10 set. 2025.