

AVALIAÇÃO NORMATIVA E ANALÍTICA DE FÓSFORO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: UMA REVISÃO COMPARATIVA DAS DIRETRIZES BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS

Antônio Rodrigues da Silva Neto*

Jonas Inácio Faria Neto*

Vanessa Nunes Alves*

Resumo: Este trabalho, orientado pela Prof.^a Dr.^a Vanessa Nunes Alves, tem como tema “Avaliação normativa e analítica do fósforo em águas subterrâneas: uma revisão comparativa das diretrizes brasileiras e internacionais”. A gestão da qualidade das águas subterrâneas exige normas consistentes e métodos analíticos confiáveis. O estudo realiza uma revisão crítica e comparativa das principais referências aplicáveis, incluindo as Resoluções CONAMA nº 396/2008 e nº 420/2009, as normas ABNT NBR 15515 (partes 1–4), NBR 16209 e NBR 16784, a Portaria GM/MS nº 888/2021 e as diretrizes da U.S. EPA. O fósforo, especialmente na forma ortofosfato (PO_4^{3-}), foi adotado como substância de interesse. São discutidos os métodos empregados em sua determinação, desde digestão por persulfato seguida de colorimetria (APHA/EPA 365.x; 4500-P) até ICP-OES, além de práticas de QA/QC e uso de sensores *in situ*. A revisão aborda as etapas de investigação de áreas contaminadas e a avaliação de risco à saúde humana, integrando modelos conceituais. O estudo identifica convergências e lacunas entre os referenciais brasileiros e norte-americanos, propondo diretrizes de harmonização normativa e aperfeiçoamento dos protocolos analíticos voltados ao monitoramento do fósforo em águas subterrâneas.

Palavras-chave: CONAMA, fósforo, águas subterrâneas, áreas contaminadas, normas ambientais.

* Instituto de Química – UFCAT: nettokingi@gmail.com, jonasif96@gmail.com, vanessa.nunes@ufcat.edu.br

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas constituem uma das principais fontes de abastecimento hídrico no Brasil, sendo amplamente utilizadas para consumo humano, atividades industriais e irrigação. Apesar de sua importância estratégica, esses recursos estão sujeitos à contaminação decorrente de atividades antrópicas, como o lançamento inadequado de efluentes, a infiltração de resíduos sólidos, vazamentos em sistemas de armazenamento e o uso intensivo de fertilizantes na agricultura (HIRATA; FOSTER, 2012).

Nesse contexto, o gerenciamento da qualidade das águas subterrâneas no Brasil é orientado por um conjunto de instrumentos normativos, destacando-se as Resoluções CONAMA nº 396/2008 e nº 420/2009, que estabelecem diretrizes para enquadramento, monitoramento e avaliação de áreas contaminadas. Complementarmente, as normas técnicas da ABNT estruturam as etapas de investigação ambiental e avaliação de risco à saúde humana, enquanto a Portaria GM/MS nº 888/2021 define padrões de potabilidade voltados à proteção da saúde pública.

Entre os parâmetros de interesse ambiental, o fósforo merece destaque, especialmente na forma de ortofosfato, por estar associado a fontes antrópicas e a processos de eutrofização. A viabilidade do monitoramento desse parâmetro, contudo, depende da aplicação de métodos analíticos com limites de detecção compatíveis com os padrões normativos. Na rotina laboratorial, destacam-se as técnicas de espectrofotometria de absorção molecular, fundamentadas na formação de complexos coloridos como o azul de molibdênio e o vanadomolibdato, além da Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), que oferece maior sensibilidade para detecção de fósforo total em matrizes complexas.

Embora tradicionalmente mais discutido em águas superficiais, o fósforo também pode estar presente em águas subterrâneas, indicando contaminação difusa ou pontual. Assim, torna-se relevante discutir como esse parâmetro é abordado nas normas nacionais e internacionais, bem como as técnicas utilizadas para sua determinação e monitoramento.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão crítica e comparativa das principais normas brasileiras e diretrizes internacionais aplicáveis à gestão da qualidade das águas subterrâneas, utilizando o fósforo como substância de referência para discutir avanços, lacunas e possibilidades de aprimoramento do arcabouço normativo vigente.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mobilidade do fósforo no perfil do solo e sua subsequente detecção nas águas subterrâneas são influenciadas pelo potencial de oxirredução e pela presença de óxidos de ferro e alumínio. Estudos conduzidos por Holman et al. (2008) demonstram que, embora o fósforo seja frequentemente considerado imóvel devido à sua forte adsorção mineral, condições de anoxia ou saturação prolongada podem desencadear a dessorção redutiva, elevando as concentrações de ortofosfato solúvel acima dos limites de potabilidade. Essa dinâmica exige que o monitoramento em áreas de infiltração considere não apenas a concentração total, mas as frações reativas que representam risco imediato à qualidade do aquífero.

Somado aos desafios de transporte, a integridade dos resultados analíticos em programas de monitoramento de longo prazo depende da estabilidade das amostras entre a coleta e a análise. De acordo com Cruvinel et al. (2015), a preservação química com ácido sulfúrico e o controle rigoroso da temperatura são imperativos para evitar a transformação de polifosfatos e a atividade biológica que altera a concentração de ortofosfatos dissolvidos. A literatura nacional reforça que falhas na etapa de preservação podem gerar subestimativas significativas, comprometendo a interpretação do modelo conceitual da área e a eficácia das medidas de remediação propostas conforme as normas da ABNT.

Com relação ao enquadramento das águas subterrânea, a Resolução CONAMA nº 396/2008 estabelece diretrizes para a classificação e o enquadramento, definindo classes de qualidade e usos preponderantes (BRASIL, 2008). Já a Resolução CONAMA nº 420/2009 dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo e das águas subterrâneas, introduzindo a avaliação de risco à saúde

humana como ferramenta central para o gerenciamento de áreas contaminadas (BRASIL, 2009).

As normas técnicas da ABNT, especialmente a NBR 15515, estruturam as etapas de investigação ambiental — preliminar, confirmatória e detalhada — e estabelecem diretrizes para a elaboração do modelo conceitual da área, considerado elemento fundamental para a compreensão da dinâmica de contaminação e para o planejamento do monitoramento e da remediação (ABNT, 2018).

Nesse cenário de investigação, o fósforo ocorre no ambiente aquático sob diferentes formas químicas, incluindo compostos orgânicos e inorgânicos. O ortofosfato (PO_4^{3-}) representa a forma inorgânica dissolvida mais simples e biodisponível, sendo amplamente utilizado como parâmetro indicativo de contaminação por fontes antrópicas (APHA, 2017). Embora mais discutido em águas superficiais, sua presença em águas subterrâneas pode indicar infiltração de efluentes, lixiviação agrícola ou falhas em sistemas de saneamento (HIRATA; FOSTER, 2012).

A precisão na quantificação do fósforo em matrizes hídricas subterrâneas é condicionada à seleção de métodos analíticos que atendam aos limites de detecção exigidos pelas normativas vigentes. Segundo o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), a determinação de fósforo total requer uma etapa prévia de digestão ácida com persulfato de potássio, visando a conversão de formas orgânicas e condensadas em ortofosfato. Para a quantificação propriamente dita, o método colorimétrico do ácido ascórbico (azul de molibdênio) é amplamente consolidado na literatura por sua elevada sensibilidade em baixas concentrações (MURPHY; RILEY, 1962; APHA, 2017).

Todavia, em cenários de investigação de áreas contaminadas, conforme preconizado pela Resolução CONAMA nº 420/2009, técnicas instrumentais como a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) têm ganhado espaço, uma vez que minimizam interferências de matriz e permitem a análise multielementar simultânea (EPA, 2014). Apesar disso, o custo de implantação e operação limita sua aplicação em programas de monitoramento em larga escala.

1. Gerenciamento de águas subterrâneas e áreas contaminadas

A Resolução CONAMA nº 396/2008 estabelece a classificação das águas subterrâneas de acordo com seus usos preponderantes, definindo diretrizes para enquadramento e monitoramento. Essa norma representa um avanço ao reconhecer a necessidade de proteger os aquíferos de forma preventiva, considerando tanto a qualidade natural quanto os impactos decorrentes de atividades humanas.

A Resolução CONAMA nº 420/2009 complementa esse arcabouço ao tratar especificamente do gerenciamento de áreas contaminadas, estabelecendo valores orientadores para solo e água subterrânea e introduzindo a avaliação de risco à saúde humana como ferramenta central para tomada de decisão. Essa abordagem permite avaliar a necessidade de intervenções, considerando cenários de exposição e receptores potenciais.

As normas técnicas da ABNT, em especial a NBR 15515 (partes 1 a 4), estruturam metodologicamente as etapas de investigação ambiental — preliminar, confirmatória e detalhada — e fornecem diretrizes para elaboração de modelos conceituais da área, fundamentais para compreender os mecanismos de contaminação e orientar ações de monitoramento e remediação.

2. Fósforo em águas subterrâneas

O fósforo ocorre no ambiente aquático em diferentes formas químicas, incluindo compostos orgânicos e inorgânicos. Dentre essas, o ortofosfato representa a forma inorgânica dissolvida mais simples e biodisponível. Sua presença em águas subterrâneas pode estar associada à infiltração de efluentes domésticos, lixiviação de fertilizantes agrícolas ou mobilização de fósforo do solo em condições geoquímicas específicas.

Embora não seja tradicionalmente classificado como contaminante prioritário em áreas contaminadas, o fósforo possui relevância ambiental por atuar como nutriente limitante e por indicar possíveis fontes de contaminação antrópica. Nesse sentido, sua inclusão em programas de monitoramento contribui para uma avaliação mais abrangente da qualidade das águas subterrâneas.

3. Diretrizes internacionais e comparação normativa

As diretrizes da U.S. EPA apresentam uma abordagem consolidada para avaliação da qualidade de águas subterrâneas, com forte ênfase na avaliação de risco à saúde humana, definição de critérios numéricos e estratégias de monitoramento. Em comparação, observa-se que o arcabouço normativo brasileiro possui estrutura conceitual semelhante, porém com menor detalhamento específico para nutrientes como o fósforo, evidenciando oportunidades de aprimoramento.

A Resolução CONAMA nº 396/2008 estabelece diretrizes para o enquadramento das águas subterrâneas, enquanto a CONAMA nº 420/2009 define valores orientadores para áreas contaminadas. As normas ABNT estruturam as etapas de investigação ambiental e avaliação de risco. A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece padrões de potabilidade, conectando qualidade ambiental e saúde pública. As diretrizes da EPA são utilizadas como referência internacional comparativa. No Quadro 1 é possível visualizar o número das normas utilizadas para esta revisão e seus principais focos.

Quadro 1: Normas vigentes para monitoramento dos recursos hídricos e suas principais abordagens.

Norma/Órgão	Foco Principal	Aplica-se a águas subterrâneas	Trata fósforo	Estabelec e limite	Enfoque analítico	Status para fósforo
CONAMA 396/2008	Águas Subterrâneas	Sim	Não	Não	Não	Lacuna normativa
CONAMA 420/2009	Áreas Contaminadas	Sim	Não	Não	Não	Lacuna normativa
Portaria GM/MS 888/2021	Potabilidade	Indiretamente	Não	Não	Não	Lacuna normativa
ABN NBR 15515 (1-4)	Investigação ambiental	Sim	Indiretamente	Não	Parcial	Abordagem indireta
ABN NBR 16209	Avaliação de risco	Sim	Indiretamente	Não	Não	Abordagem indireta
ABN NBR 16784	Modelo conceitual	Sim	Indiretamente	Não	Não	Abordagem indireta
CONAMA nº 357/2005	Águas superficiais	Não	Sim	Sim	Não	Referência técnica
EPA – Water Quality	Qualidade da água	Sim	Sim	Guideline	Sim	Referência técnica

EPA – Drinking Water	Potabilidade	Sim	Não	Não	Sim	Lacuna regulatória
----------------------	--------------	-----	-----	-----	-----	--------------------

Fontes: Autores via excel, 2026.

Quadro 2: Valores de referência para fósforo em diferentes legislações.

Legislação	Meio avaliado	Forma de fósforo	Valor máximo
CONAMA nº 357/2005	Águas superficiais	Fósforo total	0,1 mg/L
Portaria GM/MS 888/2021	Potabilidade	-	Não estabelece
CONAMA 396/2008	Águas subterrâneas	-	Não estabelece
CONAMA 420/2009	Águas subterrâneas	-	Não estabelece
EPA	Águas superficiais	Fósforo total	~0,1 mg/L

Fontes: Autores via excel, 2026.

O fósforo também é fundamental na construção do Modelo Conceitual (MCA) da área investigada. As normas técnicas da ABNT, especialmente a NBR 15515 (partes 1 a 4), estruturam as etapas de investigação:

- Investigação Preliminar e Confirmatória: O fósforo atua como indicador de fontes de contaminação, como infiltração de efluentes domésticos, lixiviação de fertilizantes ou condições geoquímicas do solo.
- Avaliação de Risco: Embora não seja tradicionalmente um contaminante prioritário por toxicidade aguda, sua presença é um indicador de qualidade e impacto antrópico.

MATERIAIS E MÉTODOS

A determinação de fósforo em águas é amplamente empregada em estudos ambientais e programas de monitoramento. O fósforo pode ser quantificado sob diferentes formas, destacando-se o fósforo total, o fósforo reativo e o ortofosfato dissolvido.

Entre os métodos mais utilizados, destaca-se a digestão da amostra por persulfato, seguida de determinação colorimétrica, conforme descrito no Standard Methods (APHA, 2017) e no método EPA 365.1. Esse procedimento converte todas as formas

de fósforo em ortofosfato, que reage com molibdato em meio ácido, formando um complexo azul mensurável por espectrofotometria.

Alternativamente, a digestão por micro-ondas tem sido empregada como técnica de preparo de amostras, proporcionando maior eficiência na oxidação de compostos orgânicos e melhor reprodutibilidade analítica (EPA, 2014).

No campo das técnicas instrumentais, a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e a espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) têm sido utilizadas para a quantificação de fósforo em matrizes aquosas. O ICP-OES apresenta vantagens como maior seletividade, automação e possibilidade de análise multielementar (SANTOS et al., 2019).

Práticas de garantia e controle de qualidade analítica (QA/QC), como uso de brancos, padrões certificados, duplicatas e curvas de calibração, são essenciais para assegurar a confiabilidade dos resultados (APHA, 2017).

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza bibliográfica, documental e analítica, baseada na revisão crítica de legislações ambientais, normas técnicas e documentos institucionais nacionais e internacionais. Foram analisadas as Resoluções CONAMA nº 396/2008 e nº 420/2009, a Portaria GM/MS nº 888/2021 e as normas ABNT relacionadas ao gerenciamento de áreas contaminadas.

Adicionalmente, foram consultados documentos técnicos e orientativos da U.S. EPA, visando à comparação de abordagens regulatórias e metodológicas. O fósforo foi selecionado como substância de referência para a análise comparativa, considerando sua relevância ambiental e sua aplicação como indicador de qualidade da água.

Não foram realizadas análises laboratoriais ou estudos de campo. A discussão sobre técnicas analíticas baseou-se exclusivamente na literatura técnica e normativa, com o objetivo de contextualizar os métodos usualmente empregados na determinação do fósforo em águas subterrâneas.

RESULTADOS

A análise comparativa das normas evidenciou que o Brasil dispõe de um arcabouço regulatório conceitualmente estruturado para o gerenciamento de águas

subterrâneas e áreas contaminadas. As Resoluções CONAMA nº 396/2008 e nº 420/2009 estabelecem diretrizes relevantes para a proteção ambiental e para a avaliação de risco à saúde humana, enquanto as normas da ABNT fornecem suporte metodológico às etapas de investigação ambiental e à elaboração do modelo conceitual da área (BRASIL, 2008; BRASIL, 2009; ABNT, 2018).

Entretanto, no que se refere ao fósforo, observa-se que sua abordagem normativa ainda é limitada, especialmente no contexto de águas subterrâneas. A Portaria GM/MS nº 888/2021 contribui ao estabelecer padrões voltados à potabilidade, porém não substitui a necessidade de critérios ambientais específicos para avaliação da qualidade subterrânea (BRASIL, 2021).

Comparativamente, as diretrizes da U.S. EPA apresentam maior integração entre parâmetros de qualidade, avaliação de risco e gestão de nutrientes, além de maior detalhamento metodológico para determinação analítica e monitoramento (EPA, 2022). Essa diferença evidencia a necessidade de aprimorar a harmonização entre valores ambientais e de potabilidade no Brasil, bem como de ampliar a discussão sobre nutrientes como potenciais indicadores de contaminação subterrânea.

Entretanto, no que se refere ao fósforo, observa-se que sua abordagem normativa ainda é limitada, especialmente no contexto de águas subterrâneas. A Portaria GM/MS nº 888/2021 contribui ao estabelecer padrões voltados à potabilidade, porém não substitui a necessidade de critérios ambientais específicos.

Comparativamente, as diretrizes da EPA apresentam maior integração entre parâmetros de qualidade, avaliação de risco e gestão de nutrientes. Essa diferença evidencia a necessidade de aprimorar a harmonização entre valores ambientais e de potabilidade no Brasil, bem como de ampliar a discussão sobre nutrientes como potenciais indicadores de contaminação subterrânea.

CONCLUSÕES

A revisão normativa realizada demonstra que o Brasil possui bases legais sólidas para o gerenciamento de águas subterrâneas e áreas contaminadas. Contudo,

a análise crítica evidencia a necessidade de aprimorar a abordagem normativa relacionada ao fósforo, especialmente no que se refere à sua relevância ambiental em aquíferos.

A comparação com diretrizes internacionais reforça a importância de integrar critérios ambientais, de saúde pública e metodológicos, visando uma gestão mais eficiente e preventiva. O fósforo, embora frequentemente associado a águas superficiais, deve ser considerado de forma mais abrangente em programas de monitoramento de águas subterrâneas.

Conclui-se que a harmonização entre normas nacionais e referências internacionais pode contribuir significativamente para o fortalecimento da gestão ambiental, ampliando a capacidade de diagnóstico e proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15515: Avaliação de passivo ambiental em solo e água subterrânea. Rio de Janeiro, 2018.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, DC, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Method 365.1: Determination of Phosphorus by Colorimetry. Washington, DC, 2014.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidelines for Groundwater Quality and Risk Assessment. Washington, DC, 2022.

HIRATA, R.; FOSTER, S. Proteção das águas subterrâneas: fundamentos e aplicações. São Paulo: Instituto Geológico, 2012.