

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM PROTOCOLO COLORIMÉTRICO PORTÁTIL (KIT DE CAMPO) PARA DETERMINAÇÃO EXPEDITA DE FÓSFORO EM ÁGUAS SUPERFICIAIS E ENXURRADAS

Marco Fruhauf de Oliveira *

Orientador: Lincoln Lucílio Romualdo *

Resumo: A gestão da qualidade da água em biomas como o Cerrado exige ferramentas de monitoramento ambiental acessíveis e rápidas. O fósforo (P), liberado em enxurradas após a queima anual de pastagens, é um nutriente crítico cujo aporte aos corpos hídricos adjacentes intensifica o processo de eutrofização. A análise laboratorial padrão, baseada em espectrofotometria, é eficaz, mas logisticamente inviável para triagens em campo.

Este trabalho, orientado pelo Prof. Dr. Lincoln Lucílio Romualdo, propõe o desenvolvimento de um Kit Colorimétrico Portátil de baixo custo, focado na determinação expedita de fosforo reativo solúvel (P) em enxurradas. A metodologia utiliza o princípio do complexo azul de molibdênio (Ácido Ascórbico/Molibdato), otimizado para produção de uma reação de cor estável e visível. O TCC envolverá a otimização dos reagentes do kit e a criação de uma escala de cores de referência para comparação visual das concentrações.

A validação do protocolo será o ponto central de originalidade, onde amostras de enxurradas de pastagens queimadas serão analisadas em paralelo: pelo Kit de Campo (avaliação visual) e pelo Método Padrão (espectrofotometria de laboratório). A comparação dos resultados quantificará o erro relativo do kit.

Palavras-chave: Monitoramento ambiental; Qualidade da água; Eutrofização; Tecnologia sustentável; Ferramenta analítica.

* Instituto de Química – UFCAT: marco.fruhauf@gmail.com, lincolnromualdo@ufcat.edu.br.

INTRODUÇÃO

A gestão da qualidade da água em biomas como o Cerrado, representa um dos maiores desafios para o monitoramento ambiental contemporâneo, exigindo ferramentas que sejam simultaneamente rápidas e acessíveis. Este ecossistema é frequentemente impactado pela queima anual de pastagens, uma prática que libera quantidades significativas de fósforo (P) no solo. Durante o período chuvoso, esse nutriente é transportado por enxurradas diretamente para os corpos hídricos adjacentes, desencadeando um aporte de nutrientes que intensifica o processo de eutrofização. Embora seja essencial para a vida, especialmente quando incorporado por organismos autotróficos na configuração de ortofosfato, sua abundância descontrolada em ambientes aquáticos é um indicador crítico de desequilíbrio.

As fontes de fósforo em ambientes aquáticos dividem-se em naturais e antrópicas. Naturalmente, o elemento provém da dissolução de compostos do solo e da decomposição de matéria orgânica, sendo liberado de forma lenta. Contudo, a intervenção humana através de despejos domésticos, efluentes industriais, dejetos animais e o uso intensivo de fertilizantes agrícolas alterou drasticamente essa dinâmica. A baixa retenção desse elemento nos ciclos biogeoquímicos naturais resulta em uma elevada disponibilidade em águas superficiais. Esse excesso nutre a proliferação descontrolada de algas e plantas aquáticas, acelerando o processo de eutrofização.

A determinação de fósforo em água é amplamente realizada através do método do complexo azul de molibdênio. Este princípio químico baseia-se na reação do ortofosfato solúvel com o molibdato de amônio em meio ácido, formando o ácido fosfomolibdico. Posteriormente, este complexo é reduzido pelo ácido ascórbico, produzindo uma coloração azul cuja intensidade é diretamente proporcional à concentração de fósforo reativo solúvel (FRS) na amostra.

Embora a análise laboratorial baseada em espectrofotometria UV-Visível seja altamente eficaz, ela apresenta limitações logísticas significativas. O procedimento padrão exige infraestrutura complexa, incluindo o uso de espectrofotômetros, reagentes preparados na hora e protocolos de limpeza rigorosos, o que o torna inviável para triagens rápidas diretamente no campo. Além disso, as alternativas comerciais disponíveis no mercado apresentam barreiras econômicas. Colorímetros

portáteis podem custar cerca de R\$ 20.000,00, enquanto tiras reagentes de baixo custo muitas vezes carecem da precisão necessária para um monitoramento confiável. Essa lacuna tecnológica dificulta a tomada de decisão imediata em ações de diagnóstico preliminar.

Proposições como a de Mayrink et al. (2022), onde a combinação de um espectrofotômetro de baixo custo com resinas de troca iônica modificadas que permitem realizar testes rápidos, precisos de fósforo no solo e com alta correlação ($R^2=0,97$) quando comparados métodos convencionais, demonstram que técnicas acessíveis e validadas já estão disponíveis para otimizar o manejo nutricional na agricultura, permitindo redução custos e tempo de análise.

Diante deste cenário, torna-se imperativo o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e acessíveis para o monitoramento ambiental. O presente trabalho propõe o desenvolvimento e a validação de um Kit Colorimétrico Portátil de baixo custo, focado na determinação expedita de fósforo (FRS) em águas superficiais e enxurradas. A proposta fundamenta-se na adaptação do método de Tedesco et al (1995), mantendo o embasamento químico laboratorial, mas substituindo a instrumentação convencional por uma estratégia de leitura visual. O kit utiliza uma solução mista previamente preparada que, ao ser adicionada à amostra, permite a estimativa da concentração de fósforo (FRS) em apenas 10 minutos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fósforo (P) é um não metal, apresenta número atômico 15 e massa 30,97u e está situado no grupo 15 da tabela periódica (grupo do nitrogênio). Apresenta-se mole e parcialmente transparente e expressa brilho característico (fosforescente) quando no escuro (Fritzen, 2020). Segundo Fernandes (2015), o elemento não pode ser encontrado isolado, ou seja, na sua forma elementar, na natureza apresentando-se na forma de fosfatos como PO_4^{2-} , HPO_4^{2-} e H_2PO_4^- .

O elemento pode ser incorporado a organismos autotróficos quando apresenta configuração de ortofosfato (Filho, 2012). Quando na forma de fosfato orgânico está presente em tecidos animal e vegetal, dejetos animais e restos de alimentos, responsáveis pelo acúmulo dessa forma de fósforo em ambientes

aquáticos, na forma inorgânica o P está presente em fertilizantes, agrotóxicos e rochas fosfatadas (Nunes, 2013).

Para Coelho (2011) o elemento fósforo é um indicador de mudanças climáticas e desenvolve papel importante no processo de eutrofização dos corpos d'água. A liberação de fósforo em solos de forma natural ocorre de forma lenta para atendimento das demandas das plantas cultivadas assim levando a adição de fertilizantes fosfatados nos sistemas agrícolas (Pantano et al., 2016).

As fontes naturais de fósforo em ambientes aquáticos tem origem na dissolução de compostos fosfatados presentes no solo e na decomposição da matéria orgânica, as fontes de origem antrópica incluem principalmente os despejos domésticos e industriais, dejetos animais e fertilizantes agrícolas (Davis, 2016; Rosa, 2003).

A quantidade desse elemento apresenta baixa retenção nos ciclos biogeoquímicos naturais em que está inserido resultando em grande disponibilidade do elemento fósforo, o que impacta águas naturais levando a processos de eutrofização (Macedo, 2010; Santos, 2018). O processo de eutrofização resulta na redução do oxigênio dissolvido na água o que comprometendo a sobrevivência de peixes e outros organismos aquáticos, deteriorando a qualidade da água tanto para consumo humano como para fins recreativos. A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece um Valor Máximo Permitido (VMP) de $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ de fósforo total para águas doces enquadradas na Classe 1. A Resolução CONSEMA-RS nº 355/2017 estabeleceu um limite de VMP em 150 mg L^{-1} de Demanda Química de Oxigênio (DQO) para efluentes líquidos, indicando um aperfeiçoamento em legislações estaduais desenvolvidas sobre as federais.

Uma forma de determinação de fósforo em água amplamente difundida é a determinação por complexo azul de molibdênio, o método baseia-se na reação do ortofosfato (PO_4^{3-}) solúvel em água com o molibdato de amônio em meio ácido, formando o ácido fosfomolibdico (McKelvie et al., 1995; Santos, 2018). Este complexo é subsequentemente reduzido pelo ácido ascórbico, produzindo o complexo azul de molibdênio, cuja intensidade de coloração azul é proporcional à concentração de fósforo reativo solúvel (Almeida, 2012).

O método para determinação do fósforo em água foi descrito em manual por Tedesco et al (1995). Os reagentes utilizados compreendem uma solução de

molibdato de amônio, solução de ácido sulfúrico, o ácido ascórbico (agente redutor), Tartarato de Antimônio e Potássio (TAP) (catalisador), a solução padrão de fósforo reativo solúvel (curva analítica) e água deionizada (H_2O , solvente).

O procedimento analítico compreende cinco etapas:

1. Uma alíquota conhecida da amostra de água filtrada (45 μm) é transferida para um frasco de ensaio apropriado.
2. Adiciona-se o reagente ácido contendo molibdato de amônio, promovendo a formação do complexo fosfomolibdico.
3. Em seguida, adiciona-se o ácido ascórbico, que reduz o complexo, formando o azul de molibdênio.
4. A mistura é homogeneizada e deixada em repouso por 10 minutos para o completo desenvolvimento da cor.
5. A absorbância da solução é medida em espectrofotômetro, utilizando comprimento de onda em 882 nm, contra um branco reagente.

A determinação do fósforo e outros elementos do solo distante da infraestrutura dos laboratórios tornou-se uma realidade sendo referida como teste em tempo real e apresentando diversos métodos (Reddykapa et al., 2022), as determinações próximas ao local de coleta dos analitos atingiu produtores de bioinsumos (Vamvuka et al., 2025) e o monitoramento de águas superficiais de ambientes lânticos (Khaing; Hawng, 2022) o que indica a versatilidade dessa modalidade.

Diversos estudos têm investigado métodos alternativos para a determinação de fósforo (FRS) em água, bem como estratégias para reduzir os custos analíticos, sobretudo no monitoramento de águas superficiais (Silva et al., 2010; Farias, 2025; Santos, 2018). Essas abordagens incluem adaptações de métodos colorimétricos, miniaturização de procedimentos e desenvolvimento de kits portáteis, visando manter sensibilidade e confiabilidade adequadas com menor dependência de infraestrutura laboratorial. São exemplos do desenvolvimento científico produtos comerciais como:

- LaMotte Smart3 Colorimeter: Colorímetro (R\$ 20.000,00);
- Test strips: tiras reagentes de baixa precisão (25 testes, R\$ 100,00).

Apesar dos avanços descritos na literatura, muitas dessas propostas ainda apresentam custos elevados e dependem de equipamentos ou insumos especializados, o que limita sua aplicação em programas de monitoramento rotineiro. Nesse contexto, torna-se pertinente o desenvolvimento de um kit portátil de

baixo custo, no qual as soluções e reagentes possam ser previamente preparados em laboratório e empregados em campo para a determinação expedita do teor de fósforo (FRS) em águas superficiais, permitindo avaliações rápidas e tecnicamente fundamentadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi é resultado de uma pesquisa descritiva e exploratória, apresentando abordagem qualitativa e quantitativa aplicada. Como base foi levantado e revisado na bibliografia conceitos teóricos sobre a natureza do elemento fósforo, as fontes e as formas desse elemento nas águas superficiais. Além disso, foram investigadas as implicações do acúmulo de fósforo nas águas superficiais e sua detecção através de método colorimétrico assim como uma proposição para tornar a aplicação do método portátil mediante adaptação do método no sentido logístico. O desenvolvimento apresenta uma coletânea de informações sobre o atual estado da arte, balizado pela análise das técnicas disponíveis para o fósforo (Estela, 2005) e as espécies de possível detecção em águas superficiais (Hongwei et al., 2019). Para isso, foram consultados dados publicados nas bases de dados (CAPES, Google scholar e Web of Science) desde 1990 até a atualidade.

A espectroscopia de análise molecular constitui um ramo fundamental da química analítica instrumental que investiga a interação entre a radiação eletromagnética e as espécies químicas em nível molecular. No contexto específico da determinação de fósforo reativo solúvel, esta técnica manifesta-se através da espectrofotometria UV-Visível, um método analítico quantitativo que explora transições eletrônicas em moléculas ou complexos coordenados (Estela, 2005). O princípio operacional desta metodologia reside na Lei de Beer-Lambert, uma relação matemática que estabelece a correlação direta entre a concentração de uma espécie absorvente e a intensidade de radiação por ela atenuada. Expressa por:

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c$$

Onde:

A representa a absorbância (adimensional), definida como $\log_{10}(I_0/I)$, sendo I_0 a intensidade da radiação incidente e I a intensidade transmitida;

- ϵ denota o coeficiente de absortividade molar ($\text{L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$), uma constante intrínseca à espécie química em um comprimento de onda específico;
- b corresponde ao caminho óptico (cm), geralmente a largura da cubeta que contém a solução;
- c indica a concentração molar do analito (mol L^{-1}).

Esta relação é linear, válida dentro de limites de concentração específicos, transforma uma propriedade óptica (a absorbância) em uma medida quantitativa precisa de concentração, formando a base matemática para todas as determinações espectrofotométricas quantitativas (HARRIS, 2008; SKOOG et al., 2009; SKOOG et al., 2015).

O método para determinação do fósforo (FRS) em água escolhido para adaptação foi Tedesco et al (1995), que está baseado no Método 4500-P E. *Ascorbic Acid Method* e está descrito como:

Além do espectrofotômetro que opere na faixa dos $\lambda = 882 \text{ nm}$, são necessárias cinco soluções e o analito tratado por filtragem em papel filtro (milipore - $45 \mu\text{m}$) para completar o método, são elas:

- Solução de ácido sulfúrico a 2,5 M (70 ml de H_2SO_4 para cada 500ml de H_2O);
- Solução de Molibdato de amônio (20g do sal para 500ml de H_2O);
- Solução de ácido ascórbico a 0,1M (1,76g de ácido em 100ml de H_2O);
- Solução de Tartarato de Antimônio e Potássio (TAP) (0,273g do sal em 100ml de H_2O);
- Solução mista formada pelas soluções descritas anteriormente (50ml de H_2SO_4 2,5 M, 15 ml de molibdato de amônio, 30 ml de ácido ascórbico 0,1 M e 5 ml de Tartarato de Antimônio e Potássio (TAP)).

Padrões de fósforo reativo solúvel (soluções padrão com concentração de 0,0 – 0,05 – 0,10 – 0,25 e 0,50 mg L^{-1}).

- Sobrenadante da amostra de água superficial tratada com HCl 50%, agitado intermitentemente por 10 minutos e decantado por 24 horas (2ml de HCl 50% em 100 ml de amostra)

O procedimento consiste em aplicar 3 ml da solução mista em 20 ml de amostra de água superficial (analito) e após 10 minutos reagindo, determinar a

absorbância em $\lambda = 882 \text{ nm}$. A cor é estável por aproximadamente 24h. Todas as vidrarias utilizadas precisam ficar em solução de limpeza (HCl 0,1M) por 24h, sendo enxaguadas com H_2O . A sensibilidade é de $0,002 \text{ mg L}^{-1}$ na amostra.

Para a curva de calibração utiliza-se uma série de soluções padrão de fósforo (FRS) em concentrações conhecidas. Submete-se os padrões ao mesmo procedimento analítico das amostras. Constrói-se a curva relacionando absorbância (eixo y) versus concentração de fósforo (eixo x). Os dados são utilizados para ajustar uma equação linear do tipo:

$$A = a \cdot C + b$$

onde:

A = absorbância;

C = concentração de fósforo reativo solúvel (mg L^{-1});

a = coeficiente angular;

b = coeficiente linear.

A concentração de fósforo (FRS) na amostra é obtida substituindo o valor da absorbância medida na equação da curva. Caso haja diluição, o resultado deve ser corrigido pelo fator de diluição:

$$C_{\text{final}} = C_{\text{lida}} \times Fd$$

onde:

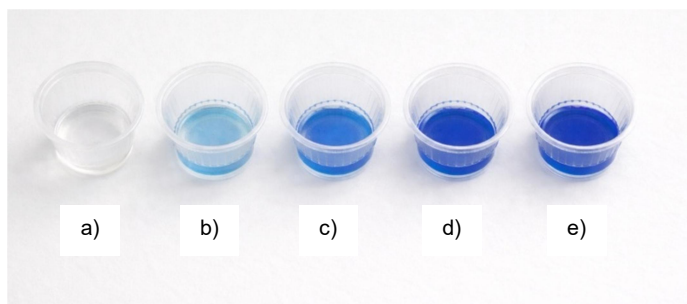
C_{final} = concentração de fósforo reativo solúvel final (mg L^{-1});

C_{lida} = concentração de fósforo reativo solúvel lida (mg L^{-1});

Fd = fator de diluição.

Os cuidados no procedimento incluem análise de branco reagente para verificação de contaminação, análises em duplicata, verificação da linearidade da curva, observar o tempo de desenvolvimento da cor (Figura - 1), controlar a temperatura, limpeza das vidrarias deixando-as livre de contaminação por fósforo, preparo da solução de ácido ascórbico no dia da análise, proteger as amostras submetidas ao desenvolvimento de cor da incidência solar, respeitar rigorosamente os tempos de reação, realizar as leituras no mesmo intervalo de tempo para padrões e amostras.

Figura 1 - Verificação de estabilidade de cor em curva padrão de FRS. a) branco; b) 0,05 mg L⁻¹; c) 0,10 mg L⁻¹; d) 0,25 mg L⁻¹; e) 0,50 mg L⁻¹.



Fonte: Autor (Coleta realizada em Nov/2022).

O banco de dados e as imagens utilizados neste estudo foram obtidos pelo autor em 2022 e posteriormente processados e analisados no presente trabalho, com vistas à conclusão da especialização.

RESULTADOS

A adaptação do método do azul de molibdênio para uso em campo fundamenta-se na manutenção do mesmo princípio químico consagrado em laboratório, com ajustes operacionais voltados à simplicidade, portabilidade e rapidez analítica. O método continua baseado na reação do ortofosfato com o molibdato em meio ácido, seguida da redução do complexo fosfomolibdênico, resultando na formação do composto de coloração azul característica. No entanto, a instrumentação convencional é substituída por estratégias de leitura visual conferindo baixo custo, permitindo a estimativa da concentração de fósforo (FRS) diretamente no local de amostragem. Essa abordagem visa possibilitar a determinação expedita do fósforo (FRS), com resultados obtidos em curto intervalo de tempo, adequados para ações de triagem, diagnóstico preliminar e apoio à tomada de decisão em campo. A simplificação dos procedimentos, associada à pré-preparação dos reagentes em laboratório, reduz a necessidade de infraestrutura analítica complexa, sem descaracterizar o embasamento químico do método. Dessa forma, a proposta busca conciliar confiabilidade analítica e viabilidade operacional, ampliando o uso da determinação de fósforo em programas de monitoramento ambiental.

A materialização de um kit de campo é essencial na proposição, a composição básica compreende:

- Tubos transparentes (vial) graduados (30 mL) contendo a curva padronizada de FRS (0,1 - 0,5 - 1,0 e 2,0 mg L⁻¹);
- Tubos transparentes (vial) graduados (30 mL);
- Seringas descartáveis (5 e 20ml);
- Filtro descartável para seringa com porosidade de 45 µm;
- Cronômetro (ou celular);
- Luvas descartáveis;
- Bloco de anotações tamanho A4 com folhas em branco;
- Frasco plástico protegido conta UV com 250 ml de solução mista (Tedesco et al., 1995).
- Caixa térmica para acondicionar soluções preparadas em laboratório;

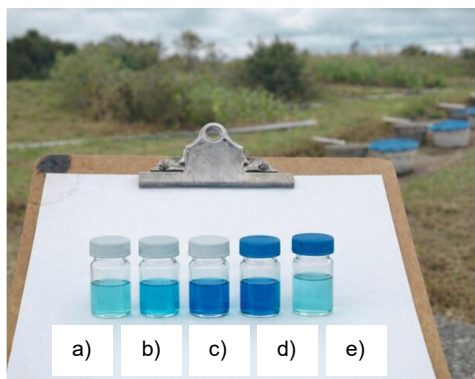
O procedimento experimental expedito para análise em campo compreende:

- Coletar 20 ml da amostra com auxílio da seringa grande acoplada ao filtro e despejar diretamente no tubo graduado;
- Adicionar 3 ml da solução mista com auxílio da seringa pequena;
- Homogeneizar suavemente por 1 minuto;
- Aguardar 10 minutos para desenvolvimento da cor;
- Comparar visualmente (Figura - 2) a cor obtida com a escala padrão que reage com a mesma quantidade do reagente misto aplicado ao analito, apoiado a descrição da cor esperada e sua respectiva concentração, sob luz natural.

Interpretação:

- Incolor a azul muito fraco: < 0,1 mg L⁻¹ P;
- Azul claro: 0,1 - 0,5 mg L⁻¹ P;
- Azul médio: 0,5 - 1,0 mg L⁻¹ P;
- Azul intenso: > 1,0 mg L⁻¹ P;

Figura 2 – Comparação visual de amostra de enxurrada com escala padrão. a) 0,1 mg L⁻¹; b) 0,5 mg L⁻¹; c) 1,0 mg L⁻¹; d) 2,0 mg L⁻¹; e) Analito.



Fonte: Autor (Coleta realizada em Set/2022).

Os valores sugeridos para as referidas intensidades de azul permitem identificar, segundo a Classificação Ambiental (CONAMA 357/2005) se o limite máximo de concentração de fósforo (FRS) estão presentes na amostra.

Para ambientes Lênticos (Lagos): O limite é de 0,03 mg L⁻¹ (Azul muito pálido) define a transição para águas que podem começar a sofrer com excesso de algas.

Ambientes Lóticos (Rios): O limite é de 0,100 mg L⁻¹ (Azul claro) é o teto para águas de Classe 3.

Assim a detecção de cor azul clara é um indicador de teor de fósforo acima do aceitável.

Os cuidados específicos para aplicação da metodologia em campo compreendem realizar amostragem adotando a filtragem, armazenar a solução mista no frasco plástico adequado com proteção UV e evitar a leitura sob luz direta. O método possui limitações, não substitui análise laboratorial, apresenta baixa sensibilidade e mesmo com filtragem é limitado a águas com baixa turbidez.

Os dados da Tabela 1, apresentam o teor determinado por espectrofotometria (Tedesco et al.,1995) e o enquadramento realizado em campo nas faixas estabelecidas pela escala de cores padronizada. Através desses dados é possível realizar a validação funcional do método expedito de campo, considerando-o como

ferramenta de triagem comparativa em relação à determinação espectrofotométrica em laboratório.

Os resultados demonstram elevada concordância entre o teor de fósforo reativo solúvel determinado por espectrofotometria e a classificação obtida por escala colorimétrica em campo. Em todas as amostras analisadas, a concentração medida instrumentalmente foi corretamente enquadrada em sua respectiva faixa de concentração da escala colorimétrica. Não foram observados casos de sub ou superestimação, o que resultaria em erro de classe. Essa correspondência indica que o método proposto apresenta adequada exatidão categórica.

Tabela 1 - Teor de fósforo reativo solúvel lido em análise por espectrofotômetro e determinado por escala colorimétrica em campo.

Amostra	Teor lido (mg L ⁻¹)	< 0,1 (mg L ⁻¹)	0,1 - 0,5 (mg L ⁻¹)	0,5 - 1,0 (mg L ⁻¹)	1,0 < 2,0 (mg L ⁻¹)	> 2,0 (mg L ⁻¹)
1	0,35		✓			
2	0,66			✓		
3	0,60			✓		
4	2,46					✓
5	3,39					✓
6	0,59			✓		
7	2,04					✓
8	0,79			✓		
9	6,58					✓
10	1,09				✓	

Fonte: Autor, 2026.

A capacidade do método de campo em identificar corretamente amostras com concentrações elevadas de fósforo ($\geq 1,0$ mg L⁻¹), como observado nas amostras 4, 5, 7, 9 e 10, é particularmente relevante do ponto de vista ambiental, uma vez que essas faixas estão associadas a maior risco de eutrofização. Da mesma forma, as amostras com concentrações intermediárias (0,5 - 1,0 mg L⁻¹) foram corretamente classificadas, sugerindo sensibilidade suficiente para aplicações de monitoramento rápido. Resultados semelhantes foram obtidos por Koralage et al. (2015), adotando

um método de extração de fósforo por ácido acético, como referência. Trabalhos com objetivos equivalentes, redução dos custos ou realização *in loco*, apresentaram resultados semelhantes, porém com dependência de espectrofotômetros portáteis comerciais (Schoepfer, 2002) ou espectrofotômetros prototipados (Moreira et al., 2016; Santos, 2018).

Assim, os dados obtidos validam o método expedito como uma ferramenta confiável para avaliação preliminar e tomada de decisão em campo, especialmente em programas de monitoramento ambiental, fiscalização e diagnóstico rápido. Ressalta-se, contudo, que o método não substitui a análise espectrofotométrica laboratorial quando são exigidos valores quantitativos precisos ou fins regulatórios, devendo ser utilizado de forma complementar.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento do kit colorimétrico portátil demonstrou ser uma alternativa de baixo custo e tecnicamente viável para a gestão da qualidade da água no Cerrado, permitindo a democratização do monitoramento ambiental em campo.

A transição do método laboratorial padrão (Azul de Molibdênio/Ácido Ascórbico) para o formato portátil foi bem-sucedida, mantendo o fundamento químico essencial da reação. A intensidade da coloração azul gerada permanece diretamente proporcional à concentração de fósforo (FRS), e a utilização de uma solução mista pré-preparada garante que a simplificação operacional não descaracterize a confiabilidade do princípio analítico.

A escala visual desenvolvida (do azul muito fraco ao intenso) é uma ferramenta eficaz para a triagem rápida de amostras de águas superficiais.

Conclui-se que o método proposto é uma ferramenta de determinação expedita para apoio à tomada de decisão imediata, embora não substitua a precisão da espectrofotometria laboratorial. O kit apresenta limitações em termos de sensibilidade e requer amostras com baixa turbidez, mas sua rapidez justifica sua adoção em programas de monitoramento rotineiro e triagens ambientais.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Catalão (UFCAT), pela infraestrutura e pela oportunidade de realização deste trabalho. Estendo meus agradecimentos a todos os servidores técnicos e administrativos que, com seu trabalho essencial, tornam possível o funcionamento desta instituição de ensino.

Aos professores do curso de especialização em Análises Químicas Ambientais, pelos ensinamentos compartilhados, pelo rigor científico e por contribuírem significativamente para a minha formação e visão crítica sobre a área.

Ao meu orientador, Professor Lincoln Lucílio Romualdo, pela confiança depositada em mim desde o início. Agradeço pela paciência, pela orientação técnica impecável e pelas valiosas discussões que foram fundamentais para o desenvolvimento e a conclusão deste projeto.

À minha família, por ser o meu porto seguro e por compreender as ausências e os momentos de dedicação aos estudos.

De forma muito especial, agradeço à minha esposa, Fernanda, pelo apoio incondicional. Sua presença, incentivo e compreensão nos momentos de cansaço foram o combustível necessário para que eu não desistisse e chegasse até aqui. Esta conquista também é sua.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. R. S. **Validação de um método analítico: Determinação de Fósforo Total. Coimbra [s.n], 2012.** Dissertação de Mestrado. 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005. Brasília, DF, 2005.

COELHO, L. H. F. **Estudo de biogeoquímico de fósforo no complexo estuarino – Lagunar de Cananéia – Iguapa (SP): Influência do valor grande e fluxo Bêntico.** 2011. Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, mestrado em Ciências, área de Oceanografia Química e Geológica. São Paulo. 2011.

CONSEMA. Resolução nº 355, de 13 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul – CONSEMA. Porto Alegre, RS, 19 de julho de 2017.

DAVIS, M. L; MASTEN, S. J. Princípios de engenharia ambiental. Porto Alegre: AMGH Editora, Porto Alegre, 2016.

ESTELA, J. M. & CERDA, V. Flow analysis techniques for phosphorus: an overview. **Talanta**, v. 66, pp. 307-331, 2005.

FARIAS, Ingrid Lima de. Avaliação de procedimentos analíticos para a determinação de fósforo total em efluentes industriais. 2025.

FERNANDES, P. C. L. **Validação e controlo de qualidade do fósforo total em águas residuais análise da qualidade de água.** 2015. Dissertação para (Mestrado em Química Industrial) – Universidade da Beira interior Ciência, Covilhã. 2015.

FILHO, P. F. J; MOURA, M. C. S; MARINS, R. V. Fracionamento Geoquímico do Fósforo em Água e Sedimentos do Rio Corrente, Bacia hidrográfica do Parnaíba /PI **Rev. Virtual Quim**, v.4, n.6, p.623-640, 2012.

FRITZEN, R. R. **Aplicação de casca de ovo calcinada na recuperação de fósforo em estações de tratamento de esgotos domésticos.** 2020. Dissertação (Pós Graduação) em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

HONGWEI, CHEN. *et al.* Detection of phosphorus species in water: technology and strategies. **Analyst**, v. 144, pp. 7130-7148, 2019.

KHAING, Moe Tin; HAWNG, Daung. Study on the water quality of Indawgyi Lake affected by surroundings. 2022.

KORALAGE, I. S. A.; SILVA, N. R. N.; DE SILVA, C. S. The determination of available phosphorus in soil: a quick and simple method. 2015.

MACEDO, C. F; SIPAÚBA, T. L. H. Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: Consequências e Recomendações. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 36, n. 2, p. 149–163, 2010.

MAYRINK, Grégory O. *et al.* Soil phosphorus test using a low-cost spectrophotometer and machine learning. **Engenharia Agrícola**, v. 42, n. 6, p. e20210228, 2022.

MCKELVIE, I. D. *in*: NOLLET, L. M. L. (Ed.), Handbook of Water Analysis, Marcel Dekker, **New York**, 2000, pp. 273–295. 2000.

MOREIRA, Alex Ferreira; SANTOS, Sérgio Ricardo Bezerra dos; JUNIOR, AG Costa. Construção e caracterização de um fotômetro destinado ao uso de aulas experimentais de química sobre a lei de Beer-Lambert. **Holos**, v. 2, p. 142-151, 2016.

NUNES, M. L. F. **Distribuição e fracionamento do fósforo nos sedimentos dos Rios Bacanga e Anil na ilha do Maranhão**. São Luís, 2013. 97f. Dissertação (mestrado em química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2013.

PANTANO, G. *et al.* Sustentabilidade no uso do fósforo: Uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Quím. Nova**, v.39, n.6, p. 732-740, 2016.

REDDYKAPA, Vinith *et al.* Real-time estimation of nitrogen, phosphorus, and potassium in soil. In: **2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)**. IEEE, 2022. p. 1-6.

ROSA, R. S; MESSIAS, R. A; AMBROZINI, B. **Importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável**. Monografia. Universidade de São Paulo 2003. São Carlos, 2003.

SANTOS, A. S. S. **Determinação de Fósforo total em águas superficiais com o uso de imagens obtidas por smartphone**. 2018. TCC Universidade Federal de Tocantins, UFT Universidade de Gurupi - Tocantins - 2018.

SCHOEPFER, Valerie. Nitrate and Phosphate Concentrations in Salt and Fresh Water. In: **Long Island Sound Research Conference**. p. 77. 2002.

SILVA, Fabíola Soraia Vital Campos Barbosa da et al. Utilização de planejamento fatorial no preparo de amostras de detergente em pó para a determinação de fósforo por análise em fluxo. **Química Nova**, v. 33, p. 1199-1203, 2010.

TEDESCO, M.J.; Análises de solo, plantas e outros materiais. ed. 2, Porto Alegre, UFRGS, 1995. 174p.

VAMVUKA, Despina et al. Co-adsorption of Ammonium, Phosphate, Strontium and Arsenate from Contaminated Water by a Low Cost Biochar. Performance and Mechanisms. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 16, n. 3, 2025.