

Aplicação de difração de raios X (DRX) na identificação de fases cristalinas em fertilizantes fosfatados

Flávio Henrique Cunha de Moura¹

Wendel Monteiro de Gois²

Cristiano Morita Barrado³

Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo⁴

Resumo: Os fertilizantes fosfatados são muito importantes para a produtividade agrícola global, pois fornecem o fósforo (P) indispensável ao crescimento das culturas. Entretanto, o uso inadequado desses insumos representa uma grave ameaça ambiental, sendo o excesso de fósforo uma das principais causas da eutrofização de corpos hídricos, degradando a qualidade da água e impactando ecossistemas aquáticos. A eficiência agrônômica e a disponibilidade de fósforo no solo estão diretamente ligadas à estrutura cristalina das fases presentes na formulação do fertilizante. Consequentemente, a identificação precisa dessas fases é muito importante, pois o padrão cristalográfico é o único indicador confiável para estimar a solubilidade do fósforo e sua cinética de liberação na matriz do solo. Para este fim é empregada a Difração de Raios X (DRX), que é uma técnica analítica primária que permite a identificação precisa das fases cristalinas, permitindo distinguir claramente compostos como fosfatos monocálcicos (característicos de superfosfato simples e triplo) e silicofosfatos (presentes em termofosfatos). O uso da DRX é essencial para a otimização do manejo, permitindo a seleção da fonte fosfatada mais adequada às condições edáficas e à demanda cultural. O conhecimento obtido por esta técnica é a base para promover uma agricultura mais sustentável e eficiente, minimizando perdas e mitigando o risco de poluição hídrica. Este trabalho apresenta uma revisão aprofundada sobre a Difração de Raios X e sua aplicação fundamental na caracterização da ciência dos fertilizantes.

Palavras-chave: Fertilizantes fosfatados; difração de raios X; estrutura cristalina; eficiência agrônômica

INTRODUÇÃO

A produção de alimentos depende da disponibilidade de nutrientes para as plantas, sendo o fósforo (P) um dos mais importantes para a produtividade agrícola

¹ Instituto de Química – UFCAT: flaviohcmoura@gmail.com

² Instituto de Química – UFCAT: wendelmgois@yahoo.com.br

³ Instituto de Química – UFCAT: cristiano@ufcat.edu.br

⁴ Instituto de Química – UFCAT: alberth@ufcat.edu.br

moderna (REETZ, 2017; FINK et al., 2016). Este elemento desempenha funções essenciais que nenhum outro nutriente pode substituir, como o estímulo ao desenvolvimento radicular e a transferência de energia celular, visto que compõe a principal moeda energética de processos metabólicos utilizada na fotossíntese molécula, a Adenosina Trifosfato (ATP) (SASABUCHI, 2023). Ao contrário do nitrogênio, que pode ser fixado da atmosfera, o fósforo é um recurso não renovável e geograficamente concentrado em poucos países, sendo extraído de rochas fosfáticas cujas reservas de alta qualidade estão em processo de exaustão (REETZ, 2017; TAIZ; ZEIGER, 2017).

No Brasil, apesar de uma geologia abundante em diversos minerais, a produção de fertilizantes fosfatados enfrenta grandes desafios. As reservas nacionais são em sua maioria de origem ígnea, resultando em rochas com teores de fósforo inferiores e presença de contaminantes que reduzem sua reatividade. Embora o agronegócio brasileiro seja um dos maiores *players* mundiais, liderando a exportação de diversas *commodities*, esse sucesso contrasta com a vulnerabilidade estratégica de autossuficiência deste insumo (BRASIL, 2023). O país importa cerca de 70% a 75% do fósforo consumido anualmente, dependência que coloca a segurança alimentar nacional e a balança comercial sob risco, uma vez que os preços são determinados pela volatilidade do mercado internacional e por tensões logísticas globais, como conflitos em regiões exportadoras e variações nos custos de fretes (GAMEIRO, 2025; SCHUELER, 2019).

O manejo deste nutriente é complexo na agricultura tropical brasileira. Os solos, majoritariamente ácidos e altamente intemperizados, possuem elevada capacidade de fixação de fósforo em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), o que reduz consideravelmente a eficiência da adubação convencional (TAIZ; ZEIGER, 2017; EMBRAPA, 2018). A problemática ambiental do P surge quando há uma divergência entre a solubilidade da fase cristalina do fertilizante e a demanda da cultura. Essa vulnerabilidade é agravada pela forma química com que o nutriente é aplicado, visto que, na maioria dos fertilizantes comerciais, o fósforo está presente na forma de ortofosfatos solúveis, levando ao uso excessivo de fontes altamente reativas em áreas de risco (REETZ, 2017; ZONTA et al., 2021).

O excedente de ortofosfatos, transportado por lixiviação ou escoamento superficial, torna-se o principal agente da eutrofização em ecossistemas aquáticos. Esse fenômeno desencadeia o crescimento desordenado de algas e plantas aquáticas (SOUZA, 2018), resultando na redução do oxigênio dissolvido, perda de biodiversidade, proliferação de cianobactérias e mortandade de peixes, além de elevar os custos do tratamento de água (CARNEIRO, 2018; SOUZA, 2018).

Historicamente, a eficiência dos fertilizantes tem sido avaliada apenas pelo teor total de P_2O_5 ou pela solubilidade em extratores convencionais. Contudo, como o fósforo disponível na solução do solo é mantido em níveis extremamente reduzidos, a prática convencional exige doses que superam as exigências fisiológicas das culturas (NAHAS, 1991; REETZ, 2017). Tais métodos quantitativos não revelam a complexidade estrutural do insumo, pois a reatividade e a cinética de liberação do fósforo são ditadas, fundamentalmente, pela sua fase cristalina (MACHADO, 2025). Neste cenário, a Difração de Raios X (DRX) se consolida como uma técnica analítica fundamental para a ciência do solo e a engenharia de materiais (SILVA, 2020).

Ao contrário das análises via úmida, a DRX permite a identificação qualitativa e quantitativa das fases minerais, possibilitando distinguir o arranjo atômico que define se o fósforo está retido em uma estrutura inerte ou disponível em uma fase reativa. Através do refinamento de perfis, como o Método de Rietveld, a DRX fornece informações sobre o grau de cristalinidade e a presença de fases amorfas, dados cruciais para prever a solubilidade real do fertilizante e sua interação com a mineralogia da argila, tornando-se uma ferramenta indispensável para a engenharia de materiais e a ciência ambiental (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

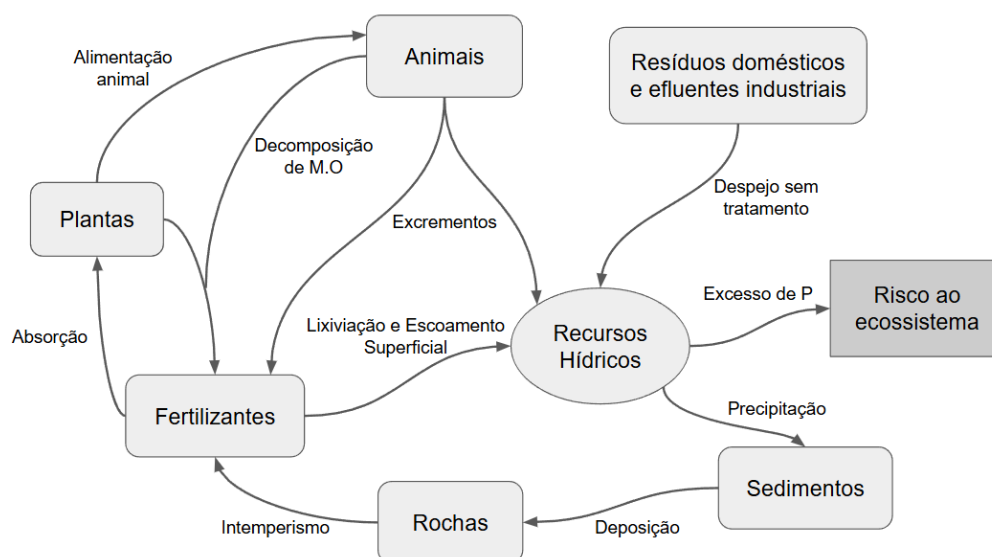
Portanto, o trabalho propõe uma revisão sobre a aplicação da DRX na caracterização de fertilizantes fosfatados. Através de levantamento bibliográfico, é analisado os princípios da técnica, a diferenciação cristalográfica entre fertilizantes acidulados e termofosfatos, e como o conhecimento da estrutura cristalina permite um manejo agrícola sustentável, otimizando a disponibilidade do nutriente e mitigando impactos nos recursos hídricos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dinâmica do fósforo no Solo

O fósforo é um elemento que apresenta uma elevada reatividade química, o que impossibilita sua ocorrência na forma elementar no ambiente natural. Ele é encontrado predominantemente sob a forma de ânions ortofosfatos (PO_4^{3-}), integrando complexas estruturas minerais em rochas de origem ígnea e sedimentar. Devido à sua configuração eletrônica, o P manifesta uma acentuada afinidade geoquímica com cátions metálicos como cálcio (Ca^{2+}), ferro (Fe^{3+}) e alumínio (Al^{3+}). Essa dinâmica de interações químicas integra um fluxo contínuo de transformações bioquímicas e geofísicas entre os diversos meios na litosfera e hidrosfera (HAROLDO, 2017; HAVLIN, 2016). Conforme ilustrado na Figura 1, o ciclo biogeoquímico do Fósforo mostra a complexidade deste nutriente e as principais formas de entrada, fixação e reciclagem do elemento no ecossistema.

Figura 1 - Ciclo do Fósforo

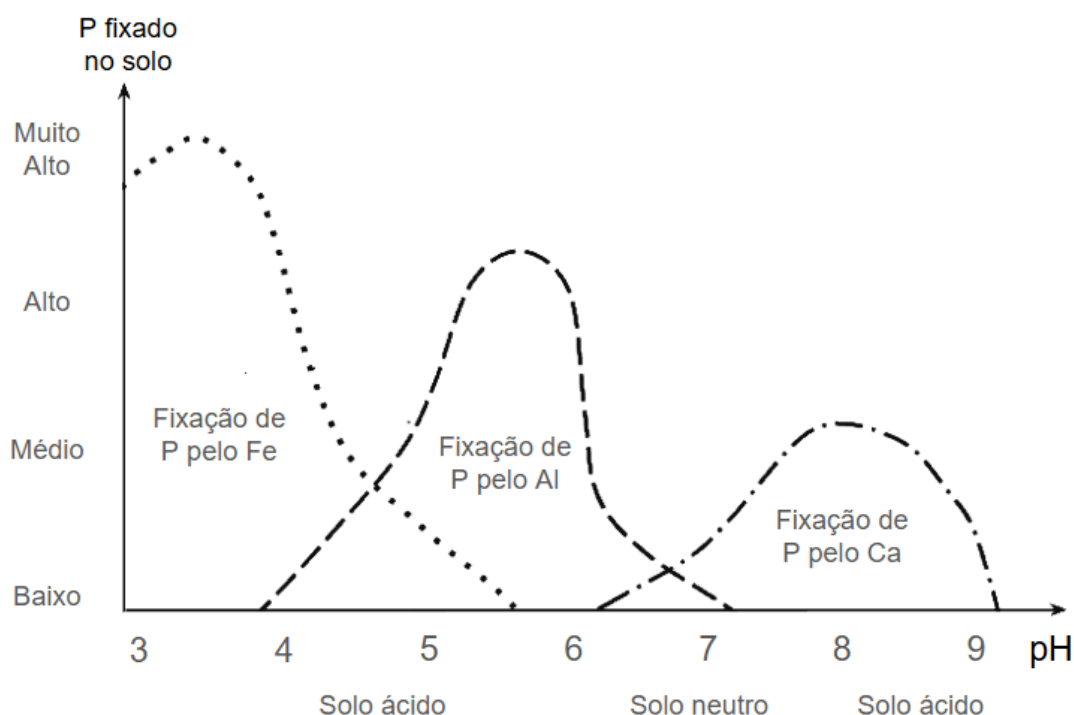


Fonte: Elaborado pelos autores

Nos solos brasileiros, classificados majoritariamente como Latossolos e Argissolos de caráter ácido e altamente intemperizados, esses metais encontram-se em abundância na fração mineralógica da argila. Eles manifestam-se principalmente

como óxidos e hidróxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita), além de argilominerais do tipo 1:1, como a caulinita. A interação entre o ortofosfato e estas superfícies minerais resulta na formação de compostos de baixíssima solubilidade, limitando drasticamente a disponibilidade do nutriente para a absorção radicular (ALEIXO, 2018; PEREIRA, 2022). Além disso, a fixação e a predominância do cátion metálico no sistema são governadas pelo índice hidrogeniônico (pH) do meio. A variação da acidez ou alcalinidade do solo altera a especiação iônica e a estabilidade dos minerais de argila, criando zonas críticas onde a disponibilidade do nutriente é severamente comprometida por processos de precipitação (BARROW, 2023; REETZ, 2017). A Figura 2 detalha essa correlação, demonstrando a relação do pH com a quantidade de fósforo fixadas pelos óxidos de ferro e alumínio em solos ácidos ou pelo cálcio em solos básicos (INPI, 2024).

Figura 2 - Influência do pH na fixação do fósforo no solo



Fonte: Elaborado pelos autores

A adsorção de P no solo ocorre primariamente por meio da precipitação química e da formação de complexos de esfera interna com os íons Fe, Al e Ca em solução. O fósforo é inicialmente retido na superfície dos colóides do solo por forças

eletrostáticas e ligações de coordenação. Com o tempo, ocorre o fenômeno da retrogradação, no qual o fósforo adsorvido difunde-se para o interior da estrutura cristalina dos colóides (CALLISTER, 2018; HAVLIN, 2016; MARQUES, 2016).

Este processo é cineticamente lento, podendo transcorrer anos até que o equilíbrio químico seja atingido, sendo o principal responsável pela redução gradual da disponibilidade de P mesmo em solos que receberam fertilização recente. Em solos com baixo histórico de adubação, as formas orgânicas de P assumem um papel protagonista no suprimento vegetal, uma vez que as frações inorgânicas encontram-se imobilizadas por processos de precipitação ou adsorção específica de alta energia (CRUZ, 2015; BRAOS, 2017).

Termodinâmica e Rede Cristalina

A complexidade do ciclo do fósforo no sistema solo-planta é agravada por sua mobilidade reduzida e interação intensa com a fase sólida. A solubilidade de qualquer composto fosfatado é consequência direta da termodinâmica de sua rede cristalina (FARIAS, 2015). Quando um fertilizante exibe uma estrutura cristalina de estabilidade alta, como a apatita original (fosfatos naturais), a energia de rede supera a energia de solvatação, resultando em uma solubilidade quase nula em condições convencionais (CRUZ, 2015; SOUSA, 2019).

Inversamente, os processos industriais de acidulação e tratamento térmico nos fertilizantes fosfatados visam a desestabilização dessas redes cristalinas robustas. O objetivo é converter minerais de alta ordem estrutural em novas fases químicas que possuam energias de ligação mais frágeis e redes mais abertas, permitindo uma solvatação eficiente e a consequente disponibilidade agrônômica do fósforo (SOUSA, 2019).

Caracterização das Principais Fontes Fosfatadas

A classificação agrônômica dos fertilizantes fosfatados é dividida, fundamentalmente, pelo processo de fabricação, que altera drasticamente a mineralogia do produto final.

As apatitas representam as principais fontes minerais de fósforo encontradas na natureza. Embora apresentem uma concentração bruta significativa desse elemento (entre 24 e 27 % de P_2O_5 total), sua estrutura cristalina rígida limita drasticamente a liberação imediata de nutrientes para as plantas, contudo, a solubilidade desses materiais é aumentada em meio ácido (LUZ, 2028; SOUSA, 2019).

Os superfosfatos são os fertilizantes acidulados mais utilizados na agricultura global. A síntese desses insumos baseia-se na reação da rocha fosfática, predominantemente composta por fluorapatita e ácidos minerais fortes como o sulfúrico ou fosfórico (LUZ, 2028; SCHUELER, 2019). A principal fase de interesse agrônômico resultante deste processo é o Fosfato Monocálcico Monohidratado ($[Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O]$). Do ponto de vista cristalográfico, esta fase apresenta um sistema monoclinico de cristalização, e sua elevada solubilidade em água é atribuída às ligações iônicas entre os grupamentos fosfato e o cátion cálcio, acentuada pela presença de moléculas de hidratação (LUZ, 2008; SOUSA, 2019).

Além do fosfato monocálcico, o Superfosfatos Simples (SPS) diferencia-se pela presença de Gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ou Anidrita ($CaSO_4$), subprodutos da reação com o ácido sulfúrico (FARIAS, 2015). Embora essas fases não forneçam fósforo, elas exercem um papel importante ao alterar a força iônica da solução na periferia do grânulo, influenciando diretamente a cinética de difusão do nutriente para a solução do solo. Já no Superfosfato Triplo (SPT), a utilização de ácido fosfórico na acidulação torna a fase de gesso virtualmente ausente, o que resulta em uma densidade superior de fósforo por unidade de massa (LUZ, 2008; SOUSA, 2019).

Os termofosfatos constituem uma categoria de fertilizantes obtida por meio de processos térmicos, contrastando com os fertilizantes acidulados. Sua produção envolve a fusão de rocha fosfática com silicatos de magnésio, como a olivina, em temperaturas que excedem $1.500^\circ C$, seguida por um processo de resfriamento brusco. Este procedimento não objetiva a obtenção de solubilidade em água, mas a reestruturação da rede mineralógica para a formação de fases cristalinas complexas,

sendo a Silicocarnotita ($[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_4]$) e a Nagelschmidtita ($[\text{Ca}_7(\text{PO}_4)_2(\text{SiO}_4)_2]$) as mais representativas (CRUZ, 2015; BRAOS, 2017; SOUSA, 2019).

Diferente das fontes aciduladas, os silicofosfatos exibem uma solubilidade gradual. Do ponto de vista cristalquímico, a introdução do íon silicato (SiO_4^{4-}) na rede cristalina ocorre por meio de uma substituição isomórfica de parte dos grupos fosfato (PO_4^{3-}). Essa arquitetura molecular resulta em uma estrutura estável em água, porém solúvel em ácidos orgânicos fracos, como os exsudatos radiculares. Agronomicamente, tal característica confere ao termofosfato um perfil de liberação controlada, o que reduz o contato imediato do fósforo livre com os óxidos de ferro e alumínio presentes na matriz do solo, mitigando drasticamente o fenômeno da quimiossorção (CRUZ, 2015; SOUSA, 2019).

Fundamentos da Difração de Raios X (DRX)

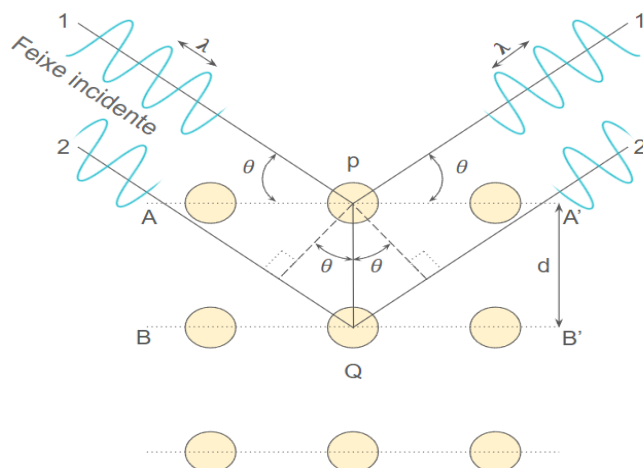
A Difração de Raios X é uma técnica analítica primária e indispensável para o estudo da matéria condensada em estado cristalino. Ela baseia-se no espalhamento da radiação eletromagnética pelos elétrons dos átomos que se encontram organizados em uma rede periódica tridimensional. Ao contrário de técnicas espectroscópicas que analisam transições eletrônicas ou vibracionais, a DRX investiga a arquitetura geométrica do material, permitindo distinguir substâncias que possuem a mesma composição química, mas diferentes arranjos espaciais (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

Os raios X utilizados na difratometria de pó são radiações ionizantes de curto comprimento de onda (cerca de 0,5 a 2,5 Å), tipicamente produzidos em tubos de vácuo onde elétrons acelerados colidem contra um anodo metálico, geralmente Cobre ou Cobalto. Ao incidirem sobre um cristal de fertilizante, esses fótons interagem com os planos atômicos paralelos gerando um padrão de difração. Esta condição geométrica é estabelecida pela Lei de Bragg, expressa matematicamente na equação 1 e representada na figura 3 (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Onde n é a ordem de difração, λ é o comprimento de onda do feixe incidente, d representa a distância entre os planos e o θ é o ângulo de incidência.

Figura 3 - Representação da Lei de Bragg



Fonte: Elaborado pelos autores

Através desta relação, a DRX permite calcular com precisão nanométrica as distâncias dentro da cela unitária do fertilizante. Como cada fase mineral possui distâncias interplanares únicas ditadas por sua estrutura atômica, a técnica permite identificar se o fósforo está contido em uma rede de fácil dissolução ou em redes estáveis e recalcitrantes (SILVA, 2020).

Preparo e Amostragem dos Fertilizantes

A qualidade de uma análise mineralógica começa no preparo rigoroso da matéria-prima, pois é necessário estabelecer protocolos práticos que respeitem as propriedades físicas do material antes mesmo de expô-la à radiação. Dessa forma, a preparação da amostra é uma etapa fundamental para assegurar que a análise seja homogênea e representativa da realidade do fertilizante (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

Como as amostras sólidas frequentemente apresentam heterogeneidade em sua composição química e granulométrica, adota-se um protocolo rigoroso de padronização com técnicas de moagem fina, homogeneização, retirada de umidade e quarteamento, visando a obtenção de um pó com partículas de dimensões

uniformes que contribui na mitigação de erros experimentais, como a contaminação cruzada e variações estatísticas indesejadas. Nessa etapa é importante reduzir as partículas a uma granulometria abaixo de $45\mu\text{m}$ para garantir que os pequenos cristais percam sua orientação original e se organizem ao acaso. Essa desorientação é fundamental para que, durante a análise, o feixe de radiação encontre planos atômicos em todas as direções possíveis, assegurando uma leitura que represente fielmente a composição mineralógica de todo o lote (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

Análise por Difração de Raios X e Leitura Mineralógica

Após a obtenção do pó, o porta-amostra é preenchido de modo que a superfície do fertilizante fique perfeitamente plana e nivelada, sem excesso de compactação. Uma superfície irregular ou desalinhada em relação ao eixo do goniômetro pode deslocar a posição dos picos, comprometendo a identificação das fases minerais. Esse rigor no controle físico da amostra é o que permite que o feixe de raios X interaja de forma construtiva com a rede cristalina organizada do material (LIMA, 2015; SILVA, 2020).

O resultado de uma análise de DRX é o difratograma, um gráfico que correlaciona a intensidade da radiação detectada em função do ângulo de varredura (2θ). Cada mineral fosfatado produz um padrão de difração único. Para assegurar a precisão quantitativa e qualitativa do difratograma, aplicam-se padrões específicos e métodos de calibração complexos, permitindo uma leitura fiel do arranjo atômico e distinção clara das fases reativas das inertes (LIMA, 2015; SILVA, 2020).

Através da posição dos picos é possível realizar uma análise qualitativa para identificar os tipos de fosfatos presentes. Complementarmente, a intensidade desses picos permite uma mensuração quantitativa das fases, enquanto a largura do pico fornece o diâmetro médio do cristalito, fator que influencia diretamente a reatividade do insumo. Quando há uma elevação na linha de base do gráfico, também conhecida como halo de espalhamento, indica a presença de material amorfo ou fases vítreas, comuns em termofosfatos de alta eficiência (LIMA, 2015; SILVA, 2020).

Em fertilizantes tecnologicamente avançados ou misturas complexas, a interpretação torna-se um desafio devido à sobreposição de picos. Para garantir a precisão dessa interpretação, é utilizado o Método de Rietveld para o refinamento matemático dos dados, o que permite ajustar modelos teóricos aos dados experimentais e determinar com exatidão os parâmetros de rede e a porcentagem de cada fase mineral (SILVA, 2020). Este refinamento não apenas quantifica as fases cristalinas presentes, mas também permite estimar a fração amorfa, parâmetro vital para avaliar a reatividade de termofosfatos, cuja estrutura vítrea é frequentemente invisível para métodos de identificação qualitativa simples.

Dinâmica da Solubilidade e o Impacto Ambiental em corpos d'água

O problema da solubilidade chega ao seu limite quando o fósforo alcança os recursos hídricos. Nesse contexto, a poluição por fósforo em corpos hídricos deve ser analisada sob a ótica da Lei nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, em conjunto com a Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelecem padrões rigorosos de qualidade e metas para o lançamento de efluentes, como é descrito no quadro 4 que detalhada especificamente para os limites de fósforo total em águas doces, classificados por tipo de ambiente (BRASIL, 1997; BRASIL, 2005).

Quadro 4 - Limites máximos de fósforo total em águas doces (mg/L P)

Classe de Qualidade	Ambiente Léntico (Água parada/lenta)	Ambiente Intermediário (Tempo de residência 2-40 dias)	Ambiente Lótico (Água corrente/rios)
Classe Especial	Manter condições naturais	Manter condições naturais	Manter condições naturais
Classe 1	0,020 mg/L	0,025 mg/L	0,1 mg/L
Classe 2	0,030 mg/L	0,050 mg/L	0,1 mg/L
Classe 3	0,05 mg/L	0,075 mg/L	0,15 mg/L
Classe 4	Não especificado	Não especificado	Não especificado

Fonte: Elaborado pelos autores

A correlação entre as diferentes fontes de fertilizantes, seus principais extratores (água e ácido cítrico a 2%) e as fases minerais predominantes identificadas via DRX está detalhada no quadro 5, cujos dados fundamentam a compreensão do comportamento desses insumos no sistema solo-planta (HAVLIN, 2016).

Quadro 5 - Fontes de fertilizantes e fase mineral por DRX

Fonte de Fertilizante	Fase Mineral Predominante (DRX)	Solubilidade em Água	Solubilidade em Ácido Cítrico (2%)	Comportamento no Solo
Superfosfato Triplo (SPT)	Fosfato Monocálcico Monohidratado	Altíssima (> 85%)	Alta	Disponibilidade imediata. Alta susceptibilidade à fixação inicial.
Superfosfato Simples (SPS)	Fosfato Monocálcico + Gipsita	Alta (> 70%)	Alta	Liberação rápida. O gesso auxilia na lixiviação de Al^{3+} em profundidade.
MAP / DAP	Fosfatos de Amônio (Monobásico/ Dibásico)	Altíssima	Altíssima	Alta solubilidade. Influencia o pH da rizosfera (acidificação ou alcalinização).
Termofosfatos	Silicocarnotita e Fases Vítreas	Baixíssima (< 5%)	Altíssima (> 80%)	Liberação gradual. Sincronia com a demanda da planta; Baixa fixação.
Fosfatos Naturais (Ígneos)	Fluorapatita (Cristalina)	Nula	Baixa (< 15%)	Baixíssima reatividade. Exige acidificação prévia ou longos períodos no solo.

Fonte: Elaborado pelos autores

Fertilizantes identificados via DRX como solúveis em água (fosfatos monocálcicos) geram um gradiente de concentração muito alto em curto espaço de tempo. Em solos tropicais, isso satura a solução e acelera a precipitação de minerais secundários como a Variscita ($AlPO_4 \cdot 2H_2O$) e a Strengita ($FePO_4 \cdot 2H_2O$). Do ponto de vista ambiental, a identificação cristalográfica é a melhor preditora do risco de eutrofização. Fontes que apresentam fases de liberação lenta (silicofosfatos e fosfatos dicálcicos) mantêm a concentração de P na solução abaixo do limiar crítico

de transporte por enxurrada, promovendo uma sincronia entre a mineralização do adubo e a demanda fisiológica da cultura (BRAOS, 2017; MACHADO, 2025; SILVA, 2020).

Conforme evidenciado nestes registros, fontes como o SPT e o SPS apresentam picos intensos de fosfato monocálcico no difratograma, o que se traduz em uma taxa de solubilização quase instantânea em meio aquoso. Embora essa característica atenda prontamente às culturas de ciclo curto, ela impõe um risco elevado em solos altamente intemperizados, onde o excesso de fósforo solúvel satura a solução do solo e é rapidamente sequestrada pelos óxidos de ferro e alumínio por meio da quimiossorção (CRUZ, 2015; SOUSA, 2019; SILVA, 2020).

Em contrapartida, os termofosfatos demonstram que a estabilidade estrutural não deve ser confundida com ineficiência. A identificação da fase mineral Silicocarnotita e o característico halo de espalhamento ou domo de amorfização (indicativo de fases vítreas/amorfas) garantem uma cinética de liberação governada pela interação com a rizosfera. Ao contrário das apatitas ígneas, que permanecem inertes devido à sua rede cristalina rígida, o arranjo atômico do termofosfato permite que o nutriente seja acessado seletivamente por ácidos orgânicos radiculares, consolidando como uma reserva estratégica de fósforo em solos tropicais (LIMA, 2015; MACHADO, 2025; SILVA, 2020).

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho possui natureza descritiva e foi fundamentado em um levantamento de materiais bibliográficos com o intuito de explorar a conexão entre a mineralogia física e a eficiência dos fertilizantes fosfatados. O processo de construção do documento iniciou-se com a consulta em bases de dados científicas disponíveis em plataformas digitais, como: Scielo, Scopus, Science, Capes, EMBRAPA, CETEM e de universidades e escolhidas por sua relevância global e regional nas áreas de geociências, química analítica e agronomia. A estratégia de busca envolveu o cruzamento de termos como fertilizantes fosfatados, fixação de fósforo, solubilidade, cristalografia, difração de Raios X e suas variações na língua portuguesa e inglesa para garantir que os resultados refletissem a aplicação da

técnica de DRX e sua relação da identificação dos fosfatos e o manejo de fertilizantes em solos agrícolas.

Para assegurar a validade e a atualidade das discussões propostas, estabeleceu-se um recorte de pesquisas entre os anos de 2014 e 2025 redigidos em português e inglês. A seleção priorizou artigos que discutem a solubilidade do fósforo e a termodinâmica da rede cristalina, Lei de Bragg, preparação de amostras e elementos que explicam por que a especiação mineral via DRX é importante para a diferenciação de fosfatos. Após a triagem inicial de títulos e resumos, os textos foram submetidos a uma leitura analítica, onde as informações foram sintetizadas de acordo com as narrativas que conectam com o tema proposto.

Apesar da escassez de estudos detalhados sobre a arquitetura mineralógica de fertilizantes comerciais, a técnica de Difração de Raios X foi selecionada como a ferramenta central desta investigação. Tal escolha justifica-se pela capacidade do DRX em preencher lacunas deixadas por análises elementares, permitindo correlacionar a estrutura cristalina do insumo com sua dinâmica de solubilidade no solo.

RESULTADOS

A análise da literatura demonstra que a eficiência dos fertilizantes fosfatados é ditada pela estabilidade termodinâmica de suas redes cristalinas, e não apenas pelo teor elementar de nutrientes. Enquanto métodos químicos tradicionais como a Fluorescência de Raios X (FRX) que permite identificar a pureza química elementar e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) detalha a morfologia e a porosidade superficial dos grânulos, a Difração de Raios X permite observar o arranjo atômico que define a cinética de liberação do fósforo no solo. O uso predominante de fontes aciduladas, como o Superfosfato Simples, embora garanta uma disponibilidade imediata de ortofosfatos, favorece o fenômeno da quimiossorção em solos tropicais ricos em óxidos de ferro e alumínio (CRUZ, 2015). Nestes cenários, a DRX identifica a presença de fases altamente solúveis, como o fosfato monocálcico, cuja rápida dissolução satura a solução do solo e acelera a precipitação de minerais secundários inertes, reduzindo o aproveitamento pelas culturas.

Em contrapartida, as pesquisas voltadas aos termofosfatos revelam uma assinatura cristalográfica distinta, marcada pela presença de silicofosfatos e frações amorfas. O emprego do Método de Rietveld permite a quantificação precisa dessas fases vítreas que são invisíveis à identificação qualitativa simples. A literatura aponta que a presença dessas estruturas desordenadas, identificadas pelo halo de espalhamento no difratograma, é o fator determinante para a solubilidade gradual desses insumos. Essa liberação controlada, mediada pela acidez da rizosfera estabelece a oferta de nutrientes e a demanda fisiológica das plantas, mitigando o excedente de fósforo superficial, principal catalisador da eutrofização em corpos hídricos.

CONCLUSÕES

A Difração de Raios X é indispensável para a ciência dos fertilizantes moderna. Ela transpõe a barreira da análise química quantitativa para a análise estrutural qualitativa ao fazer a integração dos dados cristalográficos para um manejo agrícola com uma nutrição de precisão mineralógica. Essa integração permite monitorar a eventual formação de fases insolúveis indesejadas, como os fosfatos de ferro e alumínio em estado amorfo. Sua detecção é confiável apenas através do padrão cristalográfico obtido na DRX, distinguindo as fases reativas daquelas que permanecerão inertes no sistema solo-planta.

A precisão na identificação da estrutura cristalina e do grau de pureza das fases minerais é o alicerce para uma gestão inteligente do fósforo no campo, pois pode auxiliar na prevenção do risco ambiental ao selecionar fontes de liberação lenta para áreas de vulnerabilidade hidrológica e permite o aumento da eficiência de uso do fósforo e a preservação dos serviços ecossistêmicos aquáticos.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho é fruto de uma trajetória que contou com a colaboração da Universidade Federal de Catalão, por oferecer o suporte institucional, e ao Professor Cristiano Morita Barrado, cuja orientação foi importante para o amadurecimento desta revisão.

REFERÊNCIAS

ALEIXO, Seldon. Especiação e transformações do fósforo orgânico em solos florestais e agroflorestais na região da mata atlântica no Brasil. 2018. 93 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

BARROW, N.J. and Hartemink, A.E. (2023) The Effects of pH on Nutrient Availability Depend on Both Soils and Plants. *Plant and Soil*, 487, 21-37. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>. Acesso em: 16 dez. 2025.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 08 dez. 2025.

BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 08 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Secretaria de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços. Plano nacional de fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SDIC/MGI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/confert/pnf/pnf-v-08-06-12-23.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2025.

BRAOS, L. B. Formas orgânicas e inorgânicas de fósforo em solos tratados com resíduos orgânicos e relações com disponibilidade. 2017. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal Jaboticabal. DOI:10.13140/RG.2.2.20945.99684

CARNEIRO, K.D., et al. Perdas de fósforo por lixiviação em neossolo regolítico adubado com esterco bovino curtido em condições semiáridas. 2018.

Disponível

em:

https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/4498?locale=pt_BR. Acesso em: 10 dez. 2025.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. - 9ª ed. \ (Reimpr.). Rio de Janeiro: LTC, 2018.

COSTA, K. S. de Q., Oliveira, C. F. de, Melo, M. P., Vaz, C. F., Melo, N. C., & Moraes, F. K. C. 2024. Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, 22(6), e5361. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n6-184>. Acesso em: 10 dez. 2025.

CRUZ, C. V. Efeito residual de fontes de fósforo e adubação fosfatada no crescimento do milho. 2015. 43f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. ISBN 978-85-7035-800-4

FARIAS, P. I. V.. Aspectos técnicos e econômicos da indústria de fertilizantes NPK. Dissertação (Mestrado) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14819>. Acesso em: 16 dez. 2025.

FINK JR, Inda AV, Bavaresco J, Barrón V, Torrent J & Bayer C (2016) Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. Soil & Tillage Research, 155:62-68.

GAMEIRO, A. H. Vital, limitado e mal gerido: precisamos falar sobre o fósforo. Jornal da USP. 2025. Disponível em: <https://jornal.usp.br/artigos/vital-limitado-e-mal-gerido-precisamos-falar-sobre-o-fosforo/>. Acesso em: 16 dez. 2025.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 8. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2016. 528p.

IPNI - International Plant Nutrition Institute. Homepage. International Plant Nutrition Institute, 2024. Disponível em: <http://www.ipni.net/>. Acesso em: 03 jan. 2026.

LIMA, Thiago Augustus Remacre Munareto. Síntese e caracterização de fosfatos de cálcio meso e macroporosos para sistemas de liberação controlada de fármacos. 2015. 155 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Eds.). Rochas & minerais industriais: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p..

MACHADO, R. P., & DORIGUETTO, A. C.. Conceitos em cristalografia estrutural: uma abordagem compreensiva da lei de bragg e do fator de estrutura. 2025. Química Nova, 48(1), e-20250064. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20250064>. Acesso em: 10 dez. 2025.

MARQUES, J. S. Adsorção de fósforo em latossolo e argissolo misturado com carbono pirolisado. 2016. 54 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2016.

NAHAS, E. Ciclo do fósforo: transformações microbianas. Jaboticabal. FUNEP, 1991. 67p.

OLIVEIRA, T. R.. Aplicação da difração de raios X associada ao método de Rietveld no beneficiamento mineral como ferramenta de caracterização mineralógica. 2019. 61 f. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2019.

PEREIRA, T. T. C., Oliveira, F. S., Freitas, D. F., Damasceno, B. D., Dias, A. C. A Mineralogia dos Solos Tropicais: Estado da Arte e Relação com o Uso e Manejo. Geonomos, 28, 1-14. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v28i1.29650>. Acesso em: 03 jan. 2026.

REETZ, H. F. Fertilizantes e seu uso eficiente. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.
Tradução: Alfredo Scheid Lopes. 45-52. Disponível em:
<https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficiente-WORD-Word-Ouubro-2017x-1.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2025.

SASABUCHI, I. T. M., Krieger, K. S., Nunes, R. S., Ferreira, A. C., Xavier, G. T. M., Urzedo, A. L., Carvalho, W. A., & Fadini, P. S.. (2023). SUSTENTABILIDADE NO USO DE FÓSFORO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COM FOCO NA SITUAÇÃO ATUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. Química Nova, 46(2), 185–198.
<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170967>. Acesso em: 16 dez. 2025.

SCHUELER, T. A. et al. Processos biotecnológicos para a solubilização de rochas fosfáticas: o estado da arte. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019. 45 p. (Série Tecnologia Mineral, 102).

SILVA, R. F. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. Revista Processos Químicos, [s. l.], v. 14, n. 27, p. 73–82, 2020.

SOUSA, P. V. C. Diferenciação de materiais fosfáticos fertilizantes agrícolas por espectroscopia no infravermelho. 2019. 69 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2019.

SOUZA, R. A. L. (Org.). Ecossistemas aquáticos: tópicos especiais. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), 2018. 314 p. ISBN: 978-85-7295-130-2. Disponível em:
https://portaleditora.ufra.edu.br/images/ecossistemas_aquaticos_ok.pdf. Acesso em: 10 dez. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. Porto Alegre: Artmed, 2017. 126 e 580.

ZONTA, E.; STAFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá, p. 263–303, 2021.