JOURNAL OF EDUCATION, SCIENCE AND HEALTH – JESH
Revista de Educação, Ciência e Saúde
DOI: https://www.doi.org/10.52832/jesh.v6i3.722
Home page: https://bio10publicacao.com.br/jesh
e-ISSN: 2763-6119

USO EFICIENTE DO FÓSFORO NA AGRICULTURA TROPICAL INTEGRANDO RESERVAS FINITAS, FÓSFORO LEGADO E MANEJO SUSTENTÁVEL

EFFICIENT PHOSPHORUS USE IN TROPICAL AGRICULTURE INTEGRATING FINITE PHOSPHORUS RESOURCES, LEGACY PHOSPHORUS AND SUSTAINABLE MANAGEMENT

USO EFICIENTE DEL FÓSFORO EN LA AGRICULTURA TROPICAL INTEGRANDO RESERVAS FINITAS, FÓSFORO LEGADO Y MANEJO SOSTENIBLE

Rafaela Felix da França[1*]; Diogo Paes da Costa[2]; Érika Valente de Medeiros[3]; Nilbe Carla Mapeli[4]; Cassiano Cremon[5]; Renata Cavalcante Ferreira[6]; Sara Jane Alexandre Medeiros[7]; Kaio Anderson Bezerra do Carmo[8]; José Romualdo de Sousa Lima[9]

[1]Dra. em Agronomia Ciência do Solo (UFRRJ). Pesquisadora na UFAPE, Garanhuns, Pernambuco, Brasil; [2]Dr. em Ciências Solos e Nutrição de Plantas (ESALQ). Pesquisador na UFAPE, Garanhuns, Pernambuco, Brasil; [3]Dra. em Fitotecnia (UFERSA). Professora titular na UFAPE, Garanhuns, Pernambuco, Brasil; [4]Dra. Fitotecnia- Produção Vegetal (UFV). Professora Adjunto na UNEMAT, Cáceres, Mato Grosso, Brasil; [5]Dr. em Ciência do Solo (UFGD). Professor Adjunto na UNEMAT, Cáceres, Mato Grosso, Brasil; [6,8]Graduada em Agronomia (UFAPE). Mestranda em Produção Agrícola na UFAPE, Garanhuns, Pernambuco, Brasil; 7Mestra em Produção Agrícola (UFAPE). Doutoranda em Produção Agrícola na UFAPE, Garanhuns, Pernambuco, Brasil; [9]Dr. em Tecnologias Energéticas Nucleares (UFPE). Professor titular na UFAPE, Garanhuns, Pernambuco, Brasil
*Autor correspondente: rafaelaf-f@hotmail.com

Recebido: 25/05/2026 | **Aprovado**: 08/09/2026 | **Publicado**: 17/09/2026

Resumo: O fósforo é um macronutriente sem reservatório atmosférico e sem substituto funcional na nutrição de plantas, o que torna sua disponibilidade dependente do intemperismo de rochas fosfáticas que é um recurso finito, com distribuição geopolítica assimétrica e eficiência agronômica baixa. Cerca de 85% das reservas mundiais estão concentradas em apenas cinco países, sendo o Marrocos responsável por aproximadamente 68% do total global, enquanto o Brasil importa mais de 85% dos fertilizantes que consome. Em solos tropicais intemperizados, como os Latossolos do Cerrado, a fixação do fósforo por óxidos de ferro e alumínio reduz drasticamente o aproveitamento do nutriente pelas culturas, gerando ao longo dos anos extensos estoques de fósforo residual, cujo reaproveitamento ainda enfrenta barreiras químicas e analíticas importantes. Esta revisão bibliográfica teve como objetivo analisar criticamente as principais alternativas para aumentar a eficiência do fósforo no sistema solo-planta, com ênfase nos solos tropicais brasileiros. O levantamento abrangeu 294 referências, das quais 52 foram incluídas na síntese, priorizando publicações indexadas entre 2010 e 2026. Os resultados indicam que estratégias biológicas, como a inoculação com bactérias solubilizadoras de fósforo (PSB) e fungos micorrízicos arbusculares (FMA), quando combinadas, produzem efeitos sinérgicos superiores à aplicação isolada de cada agente. Fertilizantes de liberação controlada, nanofertilizantes e a precipitação de estruvita a partir de efluentes agropecuários representam caminhos tecnologicamente viáveis, mas ainda enfrentam limitações de escalonamento, custo e regulamentação. A transição para uma agricultura fosfatada mais sustentável dependerá do fechamento dos ciclos de nutrientes e do aproveitamento do P já acumulado no solo, mais do que da expansão da extração mineral.

Palavras-chave: Fósforo residual. Solubilização biológica. Solos tropicais. Eficiência agronômica. Estruvita.

Abstract: Phosphorus is a macronutrient with no atmospheric reservoir and no functional substitute in plant nutrition, which makes its availability dependent on the weathering of phosphate rocks, a finite resource with asymmetric geopolitical distribution and low agronomic efficiency. About 85% of global reserves are concentrated in just five

countries, with Morocco accounting for approximately 68% of the world total, while Brazil imports more than 85% of the fertilizers it consumes. In weathered tropical soils, such as the Oxisols of the Brazilian Cerrado, phosphorus fixation by iron and aluminum oxides drastically reduces nutrient uptake by crops, generating over the years extensive stocks of residual phosphorus whose recovery still faces significant chemical and analytical barriers. This literature review aimed to critically analyze the main alternatives for increasing phosphorus efficiency in the soil-plant system, with emphasis on Brazilian tropical soils. The survey covered 294 references, of which 52 were included in the synthesis, prioritizing indexed publications from 2010 to 2026. Results indicate that biological strategies, such as inoculation with phosphate-solubilizing bacteria (PSB) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), when combined, produce synergistic effects superior to the isolated application of each agent. Controlled-release fertilizers, nanofertilizers, and struvite precipitation from agricultural wastewater represent technologically viable pathways, but still face constraints related to scalability, cost, and regulation. The transition to more sustainable phosphorus agriculture will depend on closing nutrient cycles and mobilizing the P already accumulated in the soil, rather than on expanding mineral extraction.

Keywords: Residual phosphorus. Biological solubilization. Tropical soils. Agronomic efficiency. Struvite.

Resumen: El fósforo es un macronutriente sin reservorio atmosférico y sin sustituto funcional en la nutrición vegetal, lo que hace que su disponibilidad dependa del intemperismo de rocas fosfáticas, un recurso finito con distribución geopolítica asimétrica y baja eficiencia agronómica. Alrededor del 85% de las reservas mundiales se concentra en apenas cinco países, siendo Marruecos responsable de aproximadamente el 68% del total global, mientras que Brasil importa más del 85% de los fertilizantes que consume. En suelos tropicales intemperizados, como los Latosoles del Cerrado brasileño, la fijación del fósforo por óxidos de hierro y aluminio reduce drásticamente el aprovechamiento del nutriente por los cultivos, generando a lo largo de los años extensas reservas de fósforo residual, cuyo reaprovechamiento aún enfrenta importantes barreras químicas y analíticas. Esta revisión bibliográfica tuvo como objetivo analizar críticamente las principales alternativas para aumentar la eficiencia del fósforo en el sistema suelo-planta, con énfasis en los suelos tropicales brasileños. El relevamiento abarcó 294 referencias, de las cuales 52 fueron incluidas en la síntesis, priorizando publicaciones indexadas entre 2010 y 2026. Los resultados indican que las estrategias biológicas, como la inoculación con bacterias solubilizadoras de fósforo (PSB) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA), cuando se combinan, producen efectos sinérgicos superiores a la aplicación aislada de cada agente. Los fertilizantes de liberación controlada, los nanofertilizantes y la precipitación de estruvita a partir de efluentes agropecuarios representan vías tecnológicamente viables, pero aún enfrentan limitaciones de escalamiento, costo y regulación. La transición hacia una agricultura fosfatada más sostenible dependerá del cierre de los ciclos de nutrientes y del aprovechamiento del P ya acumulado en el suelo, más que de la expansión de la extracción mineral.

Palabras-clave: Fósforo residual. Solubilización biológica. Suelos tropicales. Eficiencia agronómica. Estruvita.

1 INTRODUÇÃO

O fósforo ocupa um papel singular na nutrição mineral de plantas. Diferentemente do nitrogênio, que pode ser incorporado ao sistema por meio da fixação biológica, ou do carbono, que circula continuamente entre atmosfera, biosfera e solo, o fósforo não possui uma fase gasosa estável em condições ambientais naturais. Por isso, sua dinâmica depende quase exclusivamente do intemperismo das rochas e da redistribuição entre os diferentes compartimentos do solo e da água (Gerke, 2024). Essa característica faz com que a reposição natural do nutriente seja lenta, especialmente em áreas onde os estoques disponíveis já foram intensamente explorados ao longo do tempo.

Além disso, a baixa mobilidade do fósforo no perfil do solo limita ainda mais sua disponibilidade para as plantas, tornando-o um dos nutrientes mais críticos para a manutenção da produtividade agrícola em longo

prazo. Estimativas recentes apontam que mais de 40% dos solos cultivados no mundo apresentam deficiência de fósforo disponível, enquanto a eficiência de aproveitamento do nutriente pelas culturas em condições de campo dificilmente supera 15 a 20% (Jindo *et al.,* 2023; Cordell & White, 2014). Na prática, isso significa que grande parte do fósforo aplicado permanece retido no solo em formas pouco acessíveis às plantas ou acaba sendo transportada para ambientes aquáticos, contribuindo para problemas ambientais como a eutrofização.

Mesmo diante dessas limitações, a agricultura moderna ainda depende majoritariamente da exploração de rochas fosfáticas para suprir a demanda global por fertilizantes. Esse cenário evidencia uma relação de forte dependência de um recurso finito e não renovável, cuja taxa de exploração ocorre muito acima da velocidade natural de reposição no ciclo biogeoquímico do fósforo. Em uma análise amplamente discutida na literatura, Cordell & White (2014) destacam que a sociedade moderna passou a sustentar sua segurança alimentar sobre um recurso estratégico limitado, tornando o manejo eficiente do fósforo um dos principais desafios para a sustentabilidade da agricultura nas próximas décadas.

A distribuição das reservas fosfáticas mundiais configura um dos cenários de maior assimetria geopolítica entre todos os insumos agrícolas essenciais. O Marrocos e o território ocupado do Saara Ocidental concentram cerca de 70% dos depósitos conhecidos, enquanto Marrocos, China, Egito, Argélia e Síria detêm juntos 85% do total global (Brownlie *et al.,* 2022; Menegat *et al.,* 2024). Essa alta concentração em apenas cinco países, transforma o fosfato em commodity com poder de precificação unilateral, ao controlar o volume de extração e impor tarifas de exportação. Esses produtores acabam determinando os custos de fertilização agrícola global de forma análoga ao que os países da OPEP fizeram com o petróleo nas décadas anteriores (Menegat *et al.,* 2024).

Na prática, isso significa que alterações em tarifas, restrições de exportação ou conflitos internacionais têm impacto imediato sobre os custos de produção agrícola em diferentes partes do mundo. A crise desencadeada em 2022, após a invasão russa da Ucrânia, tornou essa vulnerabilidade evidente, as incertezas sobre os fornecimentos russos e bielorrussos, combinadas com as restrições chinesas às exportações de diamônio fosfato já em vigor desde 2021, provocaram perturbações simultâneas em três dos principais fornecedores globais de fertilizantes (Hebebrand & Laborde, 2023). Nesse contexto, o Marrocos ampliou sua capacidade produtiva e suas exportações de fosfato, reforçando sua posição no mercado internacional em um momento de elevada escassez (Hebebrand & Laborde, 2023). O fósforo exportado pelo país, por ser insubstituível na nutrição das culturas em escala, projeta essa posição para além do mercado de commodities, o Marrocos passou a ter um papel direto na segurança alimentar global (Tanchum, 2022).

Para o Brasil, esse cenário possui implicações especialmente relevantes. O país depende fortemente da importação de fertilizantes para sustentar culturas como soja, milho e algodão, responsáveis por grande parte da balança comercial do agronegócio. Assim, oscilações no preço internacional do fósforo impactam diretamente o custo de produção no campo. Durante o pico da crise de 2022, por exemplo, os preços de

fertilizantes fosfatados atingiram valores historicamente elevados, aumentando expressivamente os custos variáveis de produção e reduzindo margens econômicas em diversas regiões produtoras.

Ao mesmo tempo, a dependência externa ocorre em um contexto de baixa eficiência agronômica no aproveitamento do fósforo aplicado ao solo, sobretudo em ambientes tropicais. Nos Latossolos altamente intemperizados do Cerrado brasileiro, predominam minerais ricos em ferro e alumínio capazes de adsorver rapidamente parte significativa do fósforo proveniente de fertilizantes, reduzindo sua disponibilidade para as plantas. Como consequência, apenas uma fração do nutriente aplicado é efetivamente absorvida pelas culturas, enquanto o restante permanece retido no solo em formas pouco acessíveis (Lopes e Guilherme, 2016; Cora *et al.,* 2025).

Após décadas de adubações sucessivas, esse processo levou à formação de grandes estoques de fósforo residual nos horizontes superficiais do solo, frequentemente descritos na literatura como legacy phosphorus. Embora represente uma reserva potencialmente importante, esse fósforo continua parcialmente indisponível devido às mesmas interações químicas que limitaram a eficiência do fertilizante originalmente aplicado (Nascimento *et al.,* 2023; Cora *et al.,* 2025).

Diante desse cenário, cresce o interesse por estratégias capazes de aumentar a eficiência de uso do fósforo já presente no sistema produtivo, reduzindo a dependência de fontes minerais externas. Entre as alternativas mais promissoras destacam-se o uso de microrganismos solubilizadores de fósforo, fungos micorrízicos arbusculares, fertilizantes de liberação controlada com revestimento polimérico (Guelfi *et al.,* 2022) e tecnologias voltadas à recuperação de fósforo a partir de resíduos orgânicos e efluentes agropecuários, como a precipitação de estruvita. Esta revisão tem por objetivo analisar criticamente essas alternativas, discutindo os mecanismos envolvidos, as evidências disponíveis nos últimos 10 anos e as limitações que ainda precisam ser superadas, com ênfase particular na realidade edafológica dos solos tropicais brasileiros.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho constitui uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e analítico, com abordagem crítico-interpretativa voltada à síntese do estado da arte sobre a dinâmica do fósforo em sistemas agrícolas tropicais. A busca bibliográfica foi realizada nas bases Scopus, Web of Science, PubMed e Google Scholar, complementada pelo repositório Infoteca-e da Embrapa. Os descritores utilizados incluíram, em português e inglês, os termos: *"Peak Phosphorus", "phosphate rock reserves", "legacy phosphorus", "soil phosphorus fixation tropical soils", "mycorrhizal fungi phosphorus", "phosphate-solubilizing bacteria", "biochar phosphorus availability", "struvite recovery", "controlled-release phosphorus fertilizers", "circular phosphorus economy", "fósforo residual", "eficiência do fósforo em solos tropicais"* e *"solubilização biológica de fosfato"*.

O levantamento inicial resultou em 294 referências que após triagem, foram excluídos estudos sem revisão por pares, duplicatas entre bases, trabalhos fora da temática e publicações anteriores a 2016 sem

caráter clássico fundamental. Dos 86 artigos restantes 52 foram selecionados, priorizando estudos indexados em periódicos com Qualis A1 a B2 ou com equivalência em bases internacionais, publicados entre 2010 e 2026. Dados sobre reservas e produção de fosfato foram obtidos diretamente dos relatórios anuais da *Mineral Commodity Summaries* (USGS, 2024; 2026), da *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2023) e do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Reservas fosfáticas e a geopolítica do nutriente

As rochas fosfáticas de interesse agronômico se formam por dois caminhos distintos. O primeiro é sedimentar: durante períodos de intenso *upwelling* oceânico, a fluorapatita precipita em plataformas continentais rasas. Esse processo responde por cerca de 85% da oferta mundial e originou os grandes depósitos do norte da África, do Oriente Médio e dos Estados Unidos. O segundo é ígneo, associado a complexos carbonatítico-alcalinos representativo da Rússia, da África do Sul, da Finlândia e do Brasil. Os complexos alcalinos brasileiros do Cretáceo (Araxá, Catalão, Tapira) são a base da produção nacional (USGS, 2024).

Segundo os dados mais recentes do USGS (2024), as reservas globais totalizam aproximadamente 74 bilhões de toneladas métricas, com o Marrocos detendo em torno de 50 Gt, valor que corresponde a cerca de 68% do total, seguido por China (3,2 Gt), Egito (2,8 Gt) e Brasil (1,7 Gt) (Tabela 1). Em 2008, o fosfato de rocha triplicou de preço em menos de 18 meses e em 2022, o conflito Rússia-Ucrânia voltou a balançar as cadeias de abastecimento agrícola. A literatura já tratava essa desigualdade como fator de risco estrutural para a segurança alimentar global antes mesmo dessas crises (Cordell & White, 2011), os eventos apenas confirmaram o diagnóstico.

Tabela 1. Reservas mundiais de rocha fosfática por país (adaptado de USGS, 2024).

País	Reservas (Gt)	% do total mundial	Tipo geológico
Marrocos/Saara Ocidental	50,0	~68%	Sedimentar
China	3,2	~4,3%	Sedimentar/Ígneo
Egito	2,8	~3,8%	Sedimentar
Brasil	1,7	~2,3%	Ígneo
Rússia	1,3	~1,8%	Ígneo
África do Sul	1,5	~2,0%	Ígneo
EUA	1,0	~1,4%	Sedimentar
Outros	~12,5	~16,9%	Variado

Fonte: USGS, *Mineral Commodity Summaries,* 2024.

O debate em torno do esgotamento dessas reservas permanece aberto e metodologicamente controverso. Cordell, Drangert & White (2009), ao aplicarem modelagem semelhante à teoria do Pico do

Petróleo de Hubbert, projetaram o pico de produção global de fosfato para por volta de 2033. Essa estimativa foi contestada por autores como Van Kauwenbergh (2010), que, com base em reclassificação de recursos como reservas economicamente viáveis, projetou o esgotamento para além de 300 anos. Wellmer e Scholz (2013, 2017) foram mais longe ainda, argumentando que o mecanismo de preço funciona como regulador natural, onde choques de custo estimulam eficiência, abertura de novas jazidas e substituição parcial, prolongando a escassez indefinidamente. Aarab *et al.* (2024), reforçam que estimativas baseadas em dados globais agregados são metodologicamente inadequadas e que análises por país produzem intervalos muito diferentes, com as reservas chinesas sendo consumidas em prazo mais curto que as marroquinas, por exemplo.

O que essas discordâncias revelam é que escassez física e escassez econômica são coisas diferentes. O USGS (2026) afirma categoricamente que os recursos globais de fosfato superam 300 bilhões de toneladas e que não há escassez física iminente. O problema está em outro lugar: o teor médio de P_2O_5 nas jazidas em operação vem caindo, os custos de beneficiamento subindo, a geração de rejeitos ácidos crescendo e o controle das reservas se concentra em poucos países. Tudo isso aponta para uma trajetória de custo crescente que não afeta todos da mesma forma. O Brasil, com 85% de dependência externa em fertilizantes e solos de alta demanda por P, está entre os países mais expostos a essa dinâmica (MDIC, 2023).

3.2 Dinâmica do P em solos tropicais

A baixa eficiência agronômica do fósforo em solos tropicais não acontece por um fator isolado, mas por uma série de reações que operam simultaneamente e em diferentes escalas de tempo. A adsorção específica em óxidos e hidróxidos de ferro (goethita, hematita, ferriidrita) e de alumínio (gibbsita), além de argilominerais do tipo 1:1 (caulinita) constitui o mecanismo mais imediato onde o $H_2PO_4^-$ substitui grupos OH^- superficiais por reações de troca de ligantes, formando complexos de esfera interna termodinamicamente estáveis (Albuquerque *et al.,* 2022). Syers *et al.* (2008) estimaram que, em solos tropicais com teor de argila superior a 60%, essa fração pode imobilizar mais de 70% do P aplicado nas primeiras 24 horas após a incorporação. Em Latossolos Vermelhos argilosos do Cerrado, a capacidade máxima de adsorção de P frequentemente supera 2.000 mg kg^{-1}, valor que é resultado direto da elevada área superficial específica desses minerais secundários e do intenso intemperismo ao qual esses solos foram submetidos ao longo de milênios.

A precipitação constitui o segundo grande mecanismo de imobilização. Em solos com pH inferior a 5,5, a solubilidade de Al^{3+} e Fe^{3+} é suficiente para que esses cátions reajam com o fosfato dissolvido, precipitando variscita [$AlPO_4.2H_2O$] e strengita [$FePO_4.2H_2O$], minerais que se redissolvem muito mais lentamente do que a taxa de absorção radicular. Já em solos com pH mais elevado, como os Vertissolos de áreas irrigadas do semiárido, o Ca^{2+} reage com o fosfato precipitando fosfatos cálcicos de baixa solubilidade,

que tendem a converter-se em fluorapatita (Penn & Camberato, 2019). A consequência prática é que, independentemente da classe de solo ou da faixa de pH, o fósforo aplicado evolui de formas lábeis e disponíveis às plantas para formas cada vez menos reativas ao longo do tempo. A literatura chama esse processo de *aging* do P, e ele explica boa parte da pressão sobre as doses de manutenção (Syers *et al.,* 2008).

Além das transformações inorgânicas, a fração orgânica do P exerce papel relevante na dinâmica do nutriente. Em solos sob manejo com elevado teor de matéria orgânica, o P orgânico pode representar entre 30 e 65% do P total, predominantemente sob a forma de ésteres monofosfatados e fitato. Essa fração é mineralizada por fosfatases microbianas, tornando-se disponível às plantas em função da temperatura, da umidade e da atividade microbiana do solo. O único entrave é que a influência de variáveis como a sazonalidade na disponibilidade real do nutriente não é capturada pelos métodos de análise de rotina baseados em extratores químicos como Mehlich-1 ou resina de troca iônica (Bünemann *et al.,* 2012).

3.3 *Legacy phosphorus:* o estoque esquecido nas lavouras

O *legacy phosphorus* é o P acumulado no solo ao longo de décadas de adubação com eficiência abaixo do ideal. Em sistemas com aplicações contínuas, os estoques residuais na camada de 0-0,20 m podem chegar a podem atingir valores expressivos. Pavinato *et al.* (2020) estimaram que entre 1967 e 2016 acumularam-se aproximadamente 33,4 milhões de ton de P nos solos agrícolas brasileiros, com áreas cultivadas com soja e milho apresentando estoques entre 200 e 400 kg ha^{-1}. Em Latossolos do Cerrado sob plantio direto, esse P tende a estratificar-se na camada superficial, formando um reservatório de nutriente concentrado nos primeiros centímetros do solo, pouco acessível às raízes em profundidade (Rodrigues *et al.,* 2016).

Solangi *et al.* (2023) descrevem o legacy *phosphorus* como um dos dilemas centrais da sustentabilidade agrícola. Por um lado, esse fósforo acumulado representa uma reserva de elevado valor econômico e agronômico ainda pouco aproveitada, mais de 70% do P adicionado via fertilizantes permanece no solo em formas não prontamente disponíveis às culturas (Pavinato *et al.,* 2020). Por outro, ele também constitui uma importante fonte difusa de contaminação ambiental em áreas próximas a corpos hídricos. Nessas regiões, o fósforo residual pode continuar sendo transportado para rios e reservatórios por muitos anos, através do escoamento superficial e erosão, mantendo os processos de eutrofização mesmo após a interrupção das adubações fosfatadas (Solangi *et al.,* 2023). Assim, o grande desafio atual consiste em desenvolver sistemas de manejo capazes de conciliar o aproveitamento eficiente do fósforo residual com estratégias efetivas de contenção das perdas para o ambiente aquático, uma combinação que ainda apresenta limitações técnicas e operacionais significativas.

Do ponto de vista analítico, uma das principais dificuldades associadas ao manejo do *legacy phosphorus* está na limitação dos métodos tradicionais de análise de solo em estimar, de forma precisa, qual fração do fósforo acumulado poderá se tornar disponível às plantas ao longo do tempo e qual permanece fortemente estabilizada na matriz do solo. O manejo do fósforo em condições de campo continua sendo baseado, em

grande parte, nos extratores químicos desenvolvidos entre as décadas de 1960 e 1970. Segundo Bünemann *et al.* (2012), essa limitação representa uma importante lacuna técnica para o avanço de estratégias mais eficientes de recomendação fosfatada, especialmente em áreas agrícolas com longo histórico de fertilização e acúmulo de fósforo residual.

Técnicas mais recentes, como a diluição isotópica (com ^{32}P ou ^{33}P) e a *diffusive gradients in thin films* (DGT), têm demonstrado maior capacidade de estimar o potencial de liberação gradual do fósforo no solo, oferecendo interpretações mais próximas da dinâmica real do nutriente na rizosfera ao considerar processos dinâmicos de reabastecimento da solução do solo a partir da fase sólida. A diluição isotópica permite distinguir as frações de P que participam ativamente do ciclo biológico daquelas que permanecem em equilíbrio lento com a solução, fornecendo taxas de mineralização brutas e líquidas que a análise de rotina não consegue capturar (Bünemann, 2015). O DGT, por sua vez, simula o fluxo difusivo de nutrientes em direção às raízes e tem sido empregado para mapear com alta resolução espacial a distribuição do P lábil na rizosfera e na fertosfera.

Entretanto, a aplicação dessas técnicas tem ficado restrita a experimentos controlados em laboratório e a sistemas simplificados, com necessidade de validação da transferibilidade dos resultados para condições de campo (Doolette *et al.,* 2026). O custo analítico, a complexidade operacional e a dependência de equipamentos como LA-ICP-MS e microscopia de fluorescência de raios X por síncrotron limitam, por ora, a adoção dessas abordagens em escala de rotina agronômica.

3.4 Solubilização biológica por bactérias e fungos

Entre as estratégias biológicas voltadas ao aumento da disponibilidade de fósforo no solo, a inoculação com bactérias solubilizadoras de fósforo (PSB) e fungos micorrízicos arbusculares (FMA) é a que reúne o maior volume de evidências na literatura. Embora atuem por mecanismos distintos, essas abordagens apresentam efeitos complementares e, quando utilizadas em conjunto, podem promover respostas superiores às observadas quando aplicadas isoladamente (Pang *et al.,* 2024).

As PSB, incluindo gêneros como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia* e *Rhizobium,* atuam principalmente por dois mecanismos. O primeiro envolve a produção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como os ácidos glucônico, cítrico, oxálico e succínico, capazes de acidificar a rizosfera e favorecer a liberação do fósforo adsorvido aos óxidos minerais do solo. O segundo está relacionado à secreção de enzimas, como fosfatases e fitases, que promovem a mineralização de formas orgânicas de P (Pang *et al.,* 2024). Etesami, Jeong & Glick (2021) relataram aumentos entre 15 e 40% na disponibilidade de fósforo e entre 10 e 30% na absorção do nutriente pelas culturas após a inoculação com PSB. Apesar disso, a variabilidade dos resultados ainda representa um dos principais entraves para a adoção em larga escala. Em muitos casos, respostas expressivas observadas em condições controladas não se repetem em lavouras comerciais, principalmente

devido à competição com a microbiota nativa do solo e às oscilações ambientais de temperatura e umidade, que reduzem a persistência dos microrganismos introduzidos (Pang *et al.,* 2024).

Os FMA operam por outro mecanismo, suas hifas extrarradiculares, com diâmetro variando entre 2 e 7 μm, conseguem acessar microporos do solo que permanecem inacessíveis aos pelos radiculares. Estudos em campo com algodão demonstraram que as redes de hifas externas podem ampliar em até 15 vezes o volume de solo acessível à planta, com a contribuição da comunidade de FMA nativa equivalendo a até 30 kg P ha^{-1} de fertilizante fosfatado químico (Mai *et al.,* 2018). O P absorvido pelas hifas é posteriormente transferido ao hospedeiro vegetal por meio de transportadores localizados nos arbúsculos, podendo representar de 20 a 80% do fósforo captado pelo fungo (Etesami, Jeong & Glick, 2021). No entanto, existe uma limitação importante relacionada ao manejo dessa associação simbiótica, elevados teores de fósforo disponível no solo tendem a inibir naturalmente a colonização micorrízica (Tawaraya, 2022). Essa supressão é descrita na literatura como "*phosphate inhibition*" e foi confirmada tanto em experimentos de vasos quanto em condições de campo (Tawaraya, 2022). Em áreas com altos estoques de fósforo residual, portanto, a inoculação com FMA tende a apresentar retorno agronômico limitado, justamente onde ela seria mais desejável do ponto de vista da redução de adubações.

Quando PSB e FMA são aplicadas em consórcio, ocorre uma interação funcional entre os dois grupos de microrganismos. Bactérias colonizam a superfície das hifas extrarradiculares dos FMA, e as atividades de fosfatases produzidas por essas bactérias foram detectadas diretamente sobre as hifas fúngicas, compensando a limitada capacidade dos FMA em mineralizar P orgânico (Wang *et al.,* 2023). Em condições naturais, a cooperação entre microrganismos é funcionalmente e mais eficaz do que a ação isolada de um único grupo para completar funções ecológicas relacionadas ao ciclo do P (Pang *et al.,* 2024).

Experimentos conduzidos em campo por dois anos consecutivos confirmaram que PSB e FMA atuam de forma sinérgica para aumentar a biomassa e o conteúdo de P nas plantas, com a população de PSB correlacionando-se positivamente tanto com o P absorvido quanto com a esporulação e a taxa de colonização pelos FMA (Nacoon *et al.,* 2021). Segundo Etesami, Jeong & Glick (2021), a adição de silício a esse consórcio pode potencializar os efeitos observados, especialmente pela redução do estresse oxidativo radicular e pelo aprimoramento da sinalização bioquímica na interface fungo-raiz.

Ainda assim, há escassez de informação sobre os efeitos sinérgicos de FMA e PSB em solo não esterilizado, onde a competição com a comunidade microbiana nativa pode modificar substancialmente o resultado dessas interações (Nacoon *et al.,* 2021). Para Latossolos tropicais em condições reais de lavoura por exemplo, a validação em escala de campo ainda é insuficiente para sustentar recomendações de manejo generalizadas.

3.5 Nanofertilizantes e fertilizantes de liberação controlada

Os nanofertilizantes fosfatados representam a fronteira mais recente da pesquisa em fertilidade do solo. Partículas de dimensão nanométrica (1–100 nm) apresentam área superficial específica muito superior à dos fertilizantes convencionais, o que permite mecanismos de liberação controlada influenciados pelo pH, temperatura ou atividade enzimática, além de reduzir as perdas por fixação nos óxidos do solo (Mansouri *et al.,* 2025). Estudos conduzidos em laboratório e casa de vegetação relatam eficiências de uso do P superiores às dos fertilizantes solúveis convencionais. Reis *et al.* (2022) demonstraram que nanofertilizantes fosfatados de liberação lenta mantiveram maior labilidade do P no solo em comparação ao superfosfato triplo em solo tropical cultivado com forrageiras. Porém, os nanofertilizantes de P ainda enfrentam barreiras significativas para adoção em larga escala pois, os impactos ambientais de longo prazo permanecem pouco estudados, os métodos de produção são caros e de difícil escalonamento, o desempenho varia substancialmente entre solos e culturas, e os marcos regulatórios para nanopartículas agrícolas ainda estão sendo definidos (Mansouri *et al.,* 2025).

Os fertilizantes de liberação controlada encapsulados com resinas de enxofre ou polímeros biodegradáveis, estão mais próximos da aplicação prática. Sousa et al. (2022) descrevem como esses produtos sincronizam a disponibilização do nutriente com a demanda das culturas, reduzindo perdas por lixiviação e fixação. O revestimento de sementes com P nanoencapsulado ou bioinoculantes, posiciona o nutriente no microambiente imediato da semente em germinação, fase de maior vulnerabilidade da plântula e menor capacidade de exploração radicular (Skrzypczak *et al.,* 2021).

3.6 Reciclagem e economia circular do fósforo

O P aplicado ao solo não volta, uma vez absorvido pela planta e removido na colheita, perdido por erosão ou carreado pela água, ele segue para bacias hidrográficas e, eventualmente, para sedimentos oceânicos profundos, de onde nenhuma tecnologia atual consegue recuperá-lo em escala viável. Então, fechar o ciclo do P exige interceptar os fluxos antes que o nutriente se disperse além do alcance, por exemplo, efluentes de suinocultura, lodo de ETEs, águas residuárias e resíduos agroindustriais são alguns dos pontos onde a concentração ainda justifica o esforço de recuperação.

Entre as tecnologias voltadas à recuperação de fósforo, a precipitação de estruvita ($MgNH_4PO_4.6H_2O$) tem recebido destaque crescente nos últimos anos. O processo baseia-se no ajuste controlado do pH do efluente, geralmente entre 8,5 e 9,5, associado à adição de Mg^{2+}, promovendo a cristalização do mineral em condições controladas. Segundo Degryse *et al.* (2026), a estruvita pode ser utilizada como fertilizante fosfatado de liberação lenta, apresentando composição aproximada de 5% de N, 12% de P e 10% de Mg.

Uma das principais vantagens agronômicas desse material está no seu padrão de dissolução gradual no solo. Diferentemente das fontes altamente solúveis, a estruvita libera o fósforo de forma mais lenta,

reduzindo perdas por lixiviação e diminuindo a susceptibilidade à fixação imediata do nutriente, especialmente em solos com elevada capacidade de adsorção ou sujeitos a perdas por escoamento superficial. Essa característica torna a tecnologia particularmente interessante para ambientes tropicais altamente intemperizados. Apesar do potencial, os resultados agronômicos ainda apresentam variação considerável. Em condições favoráveis de solo e manejo, a produtividade obtida com estruvita costuma permanecer cerca de 10% abaixo daquela observada com fontes solúveis de fósforo na safra de aplicação. Por outro lado, o efeito residual do fertilizante nos cultivos subsequentes pode compensar parcialmente essa diferença, dependendo das características do solo e do sistema de cultivo adotado (Degryse *et al.,* 2026).

Do ponto de vista econômico, o principal entrave para ampliação da tecnologia ainda está relacionado ao custo da fonte de magnésio utilizada no processo de cristalização. O reagente magnesiano pode representar até 75% dos custos operacionais da produção de estruvita. Nesse sentido, fontes alternativas de Mg, como o *bittern* (resíduo gerado na produção de sal marinho) e a dolomita, têm sido estudadas como alternativas para reduzir os custos do processo sem comprometer a qualidade agronômica do fertilizante obtido (Bradford-Hartke *et al.,* 2021; Jia *et al.,* 2024).

Abordagens mais integradas têm combinado a precipitação de estruvita com a pirólise do resíduo sólido de lodo de esgoto para obtenção simultânea de biochar rico em fósforo. Essa lógica circular, na qual os subprodutos de uma etapa alimentam a etapa seguinte, representa um avanço conceitual relevante, mas ainda encontra limitações de escalonamento e regulamentação para adoção industrial (Bradford-Hartke e*t al.,* 2021; Jia *et al.,* 2024)

Em escala piloto, os resultados demonstraram viabilidade técnica para aplicação do sistema. Porém, a ampliação para escala industrial ainda encontra limitações que vão além dos aspectos operacionais, incluindo a ausência de marcos regulatórios e de políticas institucionais capazes de sustentar sistemas circulares de recuperação de fósforo em larga escala (Bradford-Hartke e*t al.,* 2021; Jia *et al.,* 2024).

Essa questão se torna ainda mais sensível quando se considera a presença potencial de metais pesados, micropoluentes orgânicos e agentes patogênicos em lodos e efluentes utilizados como matéria-prima. Tais contaminantes impõem restrições sanitárias legítimas ao uso agrícola desses materiais, e os critérios de controle variam entre os países, muitas vezes sem protocolos de avaliação de risco claramente estabelecidos. No Brasil, por exemplo, a ausência de uma regulamentação técnica consolidada para o uso agrícola de biossólidos ainda representa uma limitação concreta para a expansão dessas tecnologias, mesmo em regiões que já possuem capacidade técnica e infraestrutura para viabilizar sua adoção.

Existe, nesse cenário, uma contradição importante. Em muitos casos, os países que apresentam maior necessidade de reduzir a dependência de fertilizantes importados também são aqueles que dispõem de estruturas regulatórias mais frágeis para implementar sistemas circulares de recuperação e reutilização de fósforo em escala agrícola.

3.7 O Brasil no cenário global do fósforo

O Brasil ocupa posição estratégica no mercado global de fertilizantes e commodities agrícolas. Atualmente, o país figura entre os maiores consumidores mundiais de fertilizantes e mantém protagonismo nas exportações de soja, milho e carne. Apesar disso, a produção nacional ainda permanece insuficiente para atender à demanda interna. Em 2023, a produção doméstica de fertilizantes intermediários alcançou aproximadamente 6,9 milhões de ton, enquanto o consumo total ultrapassou 45 milhões de ton, resultando em dependência externa superior a 85% (Datamar, 2025). Esse cenário impõe forte impacto econômico ao setor agrícola, já que os gastos anuais com importações superam US$ 25 bilhões. A vulnerabilidade dessa estrutura tornou-se particularmente evidente durante a crise de 2022, quando o preço do diamônio fosfato saltou de cerca de US$ 400 para mais de US$ 1.000 por ton.

Embora altamente dependente das importações, o Brasil possui a quinta maior reserva mundial de fosfato em termos absolutos, estimada em aproximadamente 1,7 Gt (USGS, 2024). As principais jazidas concentram-se nos estados de Minas Gerais, especialmente em Araxá, Tapira e Serra do Salitre e Goiás, com destaque para Catalão. Entretanto, diferentemente dos depósitos sedimentares do Norte da África, as rochas fosfáticas brasileiras são predominantemente de origem ígnea e apresentam menores teores médios de P_2O_5, variando entre 4 e 15% (USGS, 2024). Essa característica exige etapas mais intensas de beneficiamento mineral para viabilizar a produção de fertilizantes fosfatados em escala comercial.

Nos últimos anos, alguns investimentos buscaram ampliar a capacidade produtiva nacional. Em março de 2024, a EuroChem inaugurou o Complexo Mineroindustrial de Serra do Salitre (MG), empreendimento que recebeu investimento aproximado de US$ 1 bilhão e possui capacidade projetada de produzir cerca de 1 milhão de ton anuais de fertilizantes fosfatados (EuroChem, 2024). Outro projeto relevante é o da Galvani, em Santa Quitéria (CE), cuja capacidade prevista de 1,05 milhão de ton por ano poderá ampliar a oferta nacional após sua conclusão.

Nesse contexto, o Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050), atualizado em 2023, estabeleceu como meta reduzir a dependência externa brasileira de fertilizantes de aproximadamente 85% para algo entre 45 e 50% até 2050 (MDIC, 2023). Entre as medidas propostas estão o mapeamento de novas áreas de exploração mineral, a criação do Centro de Excelência em Fertilizantes e Nutrição de Plantas (CEFENP) e a ampliação de incentivos fiscais voltados a novos investimentos no setor. Apesar disso, a implementação dessas estratégias ainda enfrenta obstáculos históricos relacionados à volatilidade do mercado internacional de commodities e à lentidão dos processos de licenciamento ambiental para projetos minerários. O caso do projeto de potássio em Autazes (AM), cuja viabilidade ambiental demandou mais de uma década de discussões e adequações, ilustra parte dessas dificuldades (Datamar, 2025).

Paralelamente aos investimentos industriais, o país também possui uma base científica consolidada na área de fertilidade de solos tropicais. A Embrapa conduz programas voltados ao desenvolvimento de inoculantes compostos envolvendo FBN, PSB e FMA, além de pesquisas com fontes alternativas de fósforo e

modelagem da dinâmica do nutriente em Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. Instituições como a UFV, UFLA, USP-ESALQ e UnB também vêm contribuindo significativamente em áreas relacionadas à biotecnologia vegetal, eficiência de uso de fósforo (PUE) e exsudação radicular. Trata-se de uma capacidade científica já estabelecida, embora ainda exista uma lacuna importante entre a geração do conhecimento e sua adoção efetiva em escala de campo.

3.8 Manejo, plantas mobilizadoras e melhoramento genético

A mobilização biológica do fósforo não depende exclusivamente da inoculação com microrganismos exógenos. Algumas espécies vegetais possuem elevada capacidade de modificar quimicamente a rizosfera por meio da exsudação de compostos orgânicos, favorecendo a solubilização de formas pouco disponíveis de P e contribuindo para o aproveitamento do fósforo residual pelas culturas subsequentes em sistemas de rotação (Lambers, 2022).

Entre os exemplos mais estudados está o tremoço-branco (*Lupinus albus* L.), capaz de desenvolver raízes proteóides em condições de deficiência de fósforo. Essas estruturas liberam pulsos concentrados de citrato na rizosfera, promovendo a solubilização de fosfatos associados a ferro e alumínio em solos ácidos (Lambers *et al.,* 2006). O mecanismo ocorre principalmente por troca de ligantes, em que o citrato desloca o fosfato adsorvido nas superfícies dos óxidos minerais, elevando temporariamente a concentração de fósforo em solução na região próxima às raízes (Lambers *et al.,* 2006).

Outras espécies também exibem esse comportamento, embora geralmente em menor intensidade. Fabáceas como a ervilhaca e espécies de *Brassica* spp. liberam ácidos orgânicos de baixo peso molecular, principalmente malato e citrato, que competem com o fosfato pelos sítios de adsorção nos minerais do solo e promovem a dissolução de óxidos de Fe e Al, aumentando a disponibilidade de P (Pearse *et al.,* 2006; Hallama *et al.,* 2019). A *facélia*, por sua vez, se destaca pela elevada atividade de fosfatases alcalinas, especialmente útil na mineralização de P orgânico em solos calcários (Raniro & Santner, 2024). A inserção dessas espécies em sistemas de rotação com culturas de elevada demanda fosfatada tem sido considerada uma alternativa promissora, sobretudo em áreas conduzidas sob plantio direto, onde o P tende a se estratificar na camada superficial ao longo do tempo (Leite *et al.,* 2024).

No contexto do melhoramento genético, o aumento da eficiência de uso de fósforo vem sendo associado à seleção de características radiculares específicas, como maior densidade de pelos radiculares, alterações no ângulo de crescimento das raízes laterais, favorecendo a exploração das camadas superficiais enriquecidas em P e maior capacidade de exsudação de fosfatases e ácidos orgânicos. Além disso, ferramentas de edição gênica, especialmente o sistema CRISPR-Cas9, têm sido apontadas como alternativas promissoras para introduzir ou potencializar essas características em cultivares comerciais, reduzindo parte das limitações regulatórias tradicionalmente associadas à transgenia convencional (Ceasar *et al.,* 2022). Apesar do potencial dessas abordagens, Ceasar et al. (2022) destacam que ainda são necessários estudos de validação em condições

de campo, especialmente em médio e longo prazo, para confirmar a estabilidade dessas respostas em ambientes agrícolas reais e viabilizar sua adoção em escala agronômica.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fósforo não enfrenta um risco imediato de esgotamento físico, mas a disponibilidade de fontes economicamente viáveis e geopoliticamente acessíveis tende a se tornar cada vez mais limitada. Para países dependentes da importação de fertilizantes como o Brasil, isso reforça a necessidade de ampliar a produção nacional e, ao mesmo tempo, aumentar a eficiência de uso do fósforo nos sistemas agrícolas.

Em solos tropicais altamente intemperizados, estratégias como o uso de FMA, PSB, fertilizantes de liberação controlada e sistemas de reciclagem de fósforo têm apresentado potencial relevante para melhorar o aproveitamento do nutriente. No entanto, ainda existem limitações relacionadas à variabilidade dos resultados em campo, persistência dos bioinoculantes, custos tecnológicos e ausência de regulamentações mais consolidadas para o uso agrícola de resíduos e biossólidos.

Dessa forma, a construção de uma agricultura fosfatada mais sustentável depende da integração entre manejo biológico, inovação tecnológica e políticas públicas capazes de estimular a recuperação, o reaproveitamento e o uso mais eficientes do fósforo nos solos tropicais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Ciência e a Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) - APQ-0355-5.01/25. Agradecemos também à Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE) e à Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT).

Conflitos de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesse. Todos os autores estão cientes da submissão do artigo.

Contribuições dos autores

Rafaela Felix da França, Diogo Paes da Costa, Renata Cavalcante Ferreira, Sara Jane Alexandre Medeiros e Kaio Anderson Bezerra do Carmo: concepção do estudo, levantamento bibliográfico e redação do manuscrito. **José Romualdo de Sousa Lima e Érika Valente de Medeiros:** revisão do manuscrito e correções; Nilbe Carla Mapeli e Cassiano Cremon: supervisão técnica, validação das informações e revisão final.

REFERÊNCIAS

Aarab, I., Derqaoui, M., Amari, K. E., & Yaacoubi, S. (2024). Phosphorus' future insecurity, the horror of depletion, and sustainability measures. *International Journal of Environmental Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05664-y

Albuquerque, C. G., Gavelaki, F., Melo, V. F., Motta, A. C. V., Zarbin, A. J. G., & Ferreira, C. M. (2022). Model of inner-sphere adsorption of oxyanions in goethite: Why is phosphate adsorption more significant than that of sulfate? *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0210146. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210146

Bradford-Hartke, Z., Lane, J., Lant, P., & Leslie, G. (2021). Environmental benefits and burdens of phosphorus recovery from municipal wastewater treatment plants. *Environmental Science & Technology*, 55(13), 8563–8574. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00865

Brownlie, W. J., Spears, B. M., Bruulsema, T. W., Grantham, D., Graven, H. D., Haygarth, P. M., Herrmann, L., & Withers, P. J. A. (2022). Transforming the global phosphorus system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 689–702. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00341-9

Bünemann, E. K. (2015). Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus – a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 82–98. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026

Bünemann, E. K., Oberson, A., & Frossard, E. (Eds.). (2012). *Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9

Ceasar, S. A., Hodge, A., Baker, A., & Baldwin, S. A. (2022). Phosphate concentration and the coordinated plant response to phosphorus starvation. *Journal of Experimental Botany*, 73(12), 3833–3847. https://doi.org/10.1093/jxb/erac113

Cora, J. E., Araújo, J. C., Fernandez, R. G., & Lavorenti, N. A. (2025). Long-term management strategies to optimize phosphorus utilization in a tropical maize and soybean succession. *Field Crops Research*, 322, 109736. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109736

Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009

Cordell, D., & White, S. (2011). Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability*, 3(10), 2027–2049. https://doi.org/10.3390/su3102027

Cordell, D., & White, S. (2014). Life's bottleneck: Sustaining the world's phosphorus for a food secure future. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 161–188. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-010213-113300

Datamar. (2025). *Fertilizantes: Dependência e produção nacional em 2023–2024*. Datamar Intelligence. https://www.datamarintelligence.com.br

Degryse, F., Baird, R., Doolette, C. L., & McLaughlin, M. J. (2026). Assessment of the relative agronomic effectiveness of struvite fertilizer in a temperate grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. https://doi.org/10.1007/s10705-025-10465-x

Doolette, C. L., Smith, E., Tavakkoli, E., van Zwieten, L., McKenna, B. A., & Kopittke, P. M. (2026). Mapping the fertosphere's phosphorus availability distribution in a field trial using a novel diffusive gradients in thin-films (fDGT) technique. *SOIL*, 12, 253–271. https://doi.org/10.5194/soil-12-253-2026

Etesami, H., Jeong, B. R., & Glick, B. R. (2021). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant. *Frontiers in Plant Science*, 12, 699618. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618

EuroChem. (2024). *EuroChem inaugura complexo mineroindustrial de Serra do Salitre (MG)*. EuroChem Group. https://www.eurochemgroup.com/pt

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *World fertilizer trends and outlook to 2026*. FAO.

Gerke, J. (2024). Improving phosphate acquisition from soil via higher plants while approaching peak phosphorus worldwide: A critical review of current concepts and misconceptions. *Plants*, 13(24), 3478. https://doi.org/10.3390/plants13243478

Guelfi, D., Oliveira, F. A., Guimarães, D. V., Rodrigues, F. H., & Faquin, V. (2022). Polymer-coated phosphate fertilizers: Agronomic efficiency and soil P availability in tropical soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(3), 412–424. https://doi.org/10.1002/jpln.202100355

Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H., & Kandeler, E. (2019). Hidden miners — the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and Soil*, 434, 7–45. https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7

Hebebrand, C., & Laborde, D. (2023). The Russia-Ukraine conflict and global food security: Short and long-run implications for fertilizer markets. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 45(2), 691–708. https://doi.org/10.1002/aepp.13329

Jia, X., Liu, Y., Wang, H., & Zhang, Y. (2024). Low-cost magnesium sources for struvite crystallization: Technical and economic evaluation. *Resources, Conservation and Recycling*, 202, 107380. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107380

Jindo, K., Audette, Y., Lopez Olivares, F., Canellas, L. P., Smith, D. S., & Voroney, R. P. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10, 16. https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y

Lambers, H. (2022). Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 17–42. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-103931

Lambers, H., Shane, M. W., Cramer, M. D., Pearse, S. J., & Veneklaas, E. J. (2006). Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. *Annals of Botany*, 98(4), 693–713. https://doi.org/10.1093/aob/mcl114

Leite, H. M. F., Calonego, J. C., Moraes, M. F., Mota, L. H. S. O., Silva, G. F., & Nascimento, C. A. C. (2024). How a long-term cover crop cultivation impacts soil phosphorus availability in a no-tillage system? *Plants*, 13(15), 2057. https://doi.org/10.3390/plants13152057

Lopes, A. S., & Guilherme, L. R. G. (2016). A career perspective on soil management in the Cerrado of Brazil. *Advances in Agronomy*, 137, 1–72. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004

Mai, W., Tian, J., & Li, L. (2018). Local AMF colonization and P uptake of soybean as affected by local and adjacent soil P availability and AMF hyphal links. *Science of the Total Environment*, 631–632, 1049–1057. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.054

Mansouri, M., Hasanpour, M., Ghahremani, M. H., & Yousefi, M. (2025). Development, efficiency, and impact factors of phosphorus nanofertilizers in agriculture: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, e70018. https://doi.org/10.1002/jpln.70018

Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2024). The nexus of geopolitics, decarbonization, and food security gives rise to distinct challenges across fertilizer supply chains. *One Earth*, 7(2), 210–224. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.009

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. (2023). *Plano Nacional de Fertilizantes 2050*. MDIC. https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/novembro/conselho-aprova-plano-nacional-de-fertilizantes-com-metas-para-superar-dependencia-externa

Nacoon, S., Jogloy, S., Riddech, N., Mongkolthanaruk, W., Kuyper, T. W., & Boonlue, S. (2021). Interaction between phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on growth promotion and tuber inulin content of *Helianthus tuberosus* L. *Scientific Reports*, 11, 3881. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82767-z

Nascimento, C. A. C., Guerrini, I. A., Mattiello, E. M., de Oliveira, T. S., & Alleoni, L. R. F. (2023). Long-term land use and tillage influence on phosphorus species in Brazilian Cerrado Oxisols: A multi-technique assessment. *Soil and Tillage Research*, 228, 105632. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105632

Pang, Z., Guan, X., Altaf, M. A., Cheng, S., Wan, X., & Liao, W. (2024). Mechanisms and synergistic effects of co-inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in improving plant phosphorus nutrition. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1370881. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1370881

Pavinato, P. S., Merlin, A., & Rosolem, C. A. (2020). Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, 197, 104487. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104487

Pearse, S. J., Veneklaas, E. J., Cawthray, G., Bolland, M. D. A., & Lambers, H. (2006). Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. *Plant and Soil*, 288, 127–139. https://doi.org/10.1007/s11104-006-9099-y

Penn, C. J., & Camberato, J. J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120. https://doi.org/10.3390/agriculture9060120

Raniro, H. R., & Santner, J. (2024). Differential phosphorus acquisition strategies of nine cover crop species grown in a calcareous and a decalcified chernozem. *Plant and Soil*, 498, 671–684. https://doi.org/10.1007/s11104-023-06466-w

Reis, C. E. R., Mancini, M., Guimarães, T. G., & Rodrigues, B. F. (2022). Slow-release nanophosphate fertilizer maintains greater P lability than triple superphosphate in tropical forage soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22, 2145–2158. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00789-0

Rodrigues, M., Pavinato, P. S., Withers, P. J. A., Teles, A. P. B., & Herrera, W. F. B. (2016). Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Science of the Total Environment*, 542, 1050–1061. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118

Skrzypczak, D., Mikula, K., Krawczyk, P., Trzaska, K., Izydorczyk, G., & Chojnacka, K. (2021). Phosphorus biofertilizer from struvite and microalgae as seed coating material — a review. *Science of the Total Environment*, 757, 143999. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143999

Solangi, G. S., Siyal, A. A., & Siyal, P. (2023). Soil legacy phosphorus: Global significance, challenges and management strategies — a review. *ACS Omega*, 8(11), 9680–9692. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00823

Sousa, R. O., Alleoni, L. R. F., & Matte, D. H. (2022). Controlled-release phosphorus fertilizers in tropical soils: Nutrient synchrony and crop responses. *Soil Use and Management*, 38(2), 814–826. https://doi.org/10.1111/sum.12762

Syers, J. K., Johnston, A. E., & Curtin, D. (2008). *Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 18. FAO.

Tanchum, M. (2022). *Morocco's new challenges as a gatekeeper of the world's food supply: The geopolitics, economics, and sustainability of OCP's global fertilizer exports*. Middle East Institute. https://mei.edu/publication/moroccos-new-challenges-gatekeeper-worlds-food-supply-geopolitics-economics-and

Tawaraya, K. (2022). Arbuscular mycorrhizal dependency of different plant species and cultivars. *Mycorrhiza*, 33, 1–12. https://doi.org/10.1007/s00572-022-01095-0

United States Geological Survey. (2024). *Mineral commodity summaries 2024: Phosphate rock*. USGS. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-phosphate.pdf

United States Geological Survey. (2026). *Mineral commodity summaries 2026: Phosphate rock*. USGS. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-phosphate.pdf

Van Kauwenbergh, S. J. (2010). *World phosphate rock reserves and resources*. International Fertilizer Development Center (IFDC).

Wang, X., Pan, J., Liu, H., Zhang, D., Chen, B., & Liu, R. (2023). Phosphatase activity of bacteria colonizing mycorrhizal hyphae compensates for the limited phosphorus mineralization capacity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, 177, 108896. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108896

Wellmer, F.-W., & Scholz, R. W. (2013). Peak minerals: What can we learn from the phosphorus case? *Environmental Science & Technology*, 47(13), 6997–7000. https://doi.org/10.1021/es304532n

Wellmer, F.-W., & Scholz, R. W. (2017). The right to know the geopotential of minerals for ensuring food supply security: The case of phosphorus. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180(4), 369–380. https://doi.org/10.1002/jpln.201700079