

UTILIZAÇÃO DE CONCENTRADOS DE APATITA NO MANEJO DO SOLO

Data de submissão: 29/11/2023

Data de aceite: 22/12/2023

Elcio Ferreira dos Santos

Instituto Federal of Mato Grosso do Sul,
Nova Andradina – MS
<https://orcid.org/0000-0002-1148-0527>

Karina Renostro Ducatti

Instituto Federal of Mato Grosso do Sul,
Nova Andradina – MS
<https://orcid.org/0000-0002-3744-4786>

Gutierrez Nelson Silva

Instituto Federal of Mato Grosso do Sul,
Nova Andradina – MS
<https://orcid.org/0000-0002-4272-0634>

Mateus Augusto Donega

Instituto Federal of Mato Grosso do Sul,
Nova Andradina – MS
<https://orcid.org/0000-0002-4272-0634>

Marcela Silva Carvalho

Instituto Federal of Mato Grosso do Sul,
Nova Andradina – MS
<http://orcid.org/0000-0002-8996-5743>

RESUMO: A apatita é um mineral encontrado em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, como uma fonte crucial de fósforo (P) na fabricação de ácido fosfórico para fertilizantes. Presente em diversas formações geológicas, a apatita

é comumente extraída de depósitos sedimentares e ígneos, sendo estes últimos predominantes no Brasil. O P é essencial para o crescimento das plantas, mas sua disponibilidade no solo é frequentemente limitada, especialmente em regiões tropicais. O Brasil, um dos maiores consumidores de fertilizantes fosfatados, enfrenta desafios na eficiência desses insumos, influenciada pela composição, cultura e propriedades do solo. O uso prevalente de fosfatados solúveis, embora aumente rapidamente os teores de fósforo disponível, também favorece reações de adsorção, tornando-o indisponível para as plantas. Além disso, a produção de fosfatados solúveis envolve processos dispendiosos e impactos ambientais significativos. Diante desse cenário, o presente capítulo destaca os concentrados de apatita como alternativas mais sustentáveis. Estudos indicam que esses concentrados podem elevar os teores de fósforo no solo, proporcionando resultados agrônômicos semelhantes aos fertilizantes solúveis. Em um contexto global de preocupação com a finitude dos recursos fosfatados, a busca por fontes alternativas, como a apatita, torna-se crucial para garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola.

PALAVRAS-CHAVE: adubação fosfatada, agricultura orgânica, fontes alternativas.

USE OF APATITE CONCENTRATE IN SOIL MANAGEMENT

ABSTRACT: Apatite is a mineral found in igneous, sedimentary and metamorphic rocks, as a crucial source of phosphorus (P) in the manufacture of phosphoric acid for fertilizers. Present in several geological formations, apatite is commonly extracted from sedimentary and igneous deposits, the latter being predominant in Brazil. P is essential for plant growth, but its availability in soil is often limited, especially in tropical regions. Brazil, one of the largest consumers of phosphate fertilizers, faces challenges in the efficiency of these inputs, influenced by the composition, culture and properties of the soil. The prevalent use of soluble phosphates, although it quickly increases the levels of available phosphorus, also favors adsorption reactions, making it unavailable to plants. Furthermore, the production of soluble phosphates involves expensive processes and significant environmental impacts. Given this scenario, this chapter highlights apatite concentrates as more sustainable alternatives. Studies indicate that these concentrates can increase phosphorus levels in the soil, providing agronomic results similar to soluble fertilizers. In a global context of concern about the finiteness of phosphate resources, the search for alternative sources, such as apatite, becomes crucial to guarantee food security and agricultural sustainability.

KEYWORDS: phosphate fertilizer, organic agriculture, alternative sources.

A apatita é um mineral comum largamente disseminado como mineral acessório em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. É considerada um mineral-minério de fósforo (com teor variando de 5 a 15% de P_2O_5). Devido ao componente fósforo, a principal aplicação da apatita é na fabricação de ácido fosfórico, como matéria-prima para fertilizantes. De maneira geral, a apatita pode ser encontrado pegmatitos de origem hidrotermal, corpos de magnetita titanífera e em rochas alcalinas (KLEIN & DUTROW, 2012). Em rochas ígneas ocorre como acessório de cristalização inicial, em grãos bem pequenos, (granitos, monzonitos, monzodioritos, sienitos, rochas alcalinas, carbonatitos, lamprófiros, pegmatitos graníticos), podendo formar ganga em veios hidrotermais de minerais estaníferos (UFRGS, 2020). Também podem ser formados por hidroxi- e flúor-apatita, magnetita, olivina, diopsídio e flogopita (KRASNOVA et al., 2004).

Em rochas metamórficas é estável em uma extensa faixa de pressão e temperatura, ocorrendo em mármores, escarnitos e cornubianitos, normalmente em grãos muito pequenos, podendo ser como colofano (UFRGS, 2020). Em rochas sedimentares a apatita é comum como grão detrital ou diagenético e pode formar camadas. Exibe formas oolíticas, esferulíticas e botrioidais. A variedade criptocristalina botrioidal, chamada de colofano, formada a partir de material esquelético (ossos). As carbonato-apatitas tendem a ser mais reativas que os outros tipos de apatita (KAMINSKI & PERUZZO, 1997; NATHAN, 1984). Além disso, ainda podem ocorrer também em argilitos, folhelhos e conglomerados (UFRGS, 2020). Assim colocado, o concentrado de apatita é obtido em jazidas de origem sedimentar, ígnea, e metamórfica, sendo as duas primeiras de maior importância econômica no mundo,

perfazendo 85% e 15% da oferta mundial, respectivamente (SOUZA & FONSECA, 2009). No Brasil, por outro lado, os depósitos de origem ígnea equivalem a 80% das jazidas existentes (SOUZA & FONSECA, 2009). Uma vez que os concentrados de apatita apresentam menor preço comparado às fontes aciduladas, estes podem se tornar boas alternativas no manejo de fertilidade do solo como fonte de fósforo (KPOMBLEKOU-A & TABATABAI, 2003).

É importante salientar que o fósforo (P) é considerado um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Este macronutriente faz parte de estruturas do metabolismo vegetal (e.g. açúcares-fosfatos, fosfolípidios, ácidos nucleicos, nucleotídeos) e participa das relações de transporte e armazenamento de energia. Destaca-se que esse nutriente é um dos mais limitantes para a produção agrícola brasileira (MALAVOLTA, 1997). Na maioria solos em regiões de clima tropical, o P que não é absorvido pelas raízes das plantas ou imobilizado pelos microrganismos é adsorvido na superfície de óxidos de ferro e alumínio. Esses complexos químicos apresentam baixa solubilidade em determinadas condições de pH (NOVAIS et al., 2007). Isso faz com que a quantidade de P encontrada na solução do solo seja muito menor que aquela necessária para a alta produtividade agrícola (SHEN et al., 2011).

Em solos ácidos, o P é fixado na forma de fosfatos insolúveis de ferro e alumínio, enquanto em solos alcalinos é encontrado principalmente como fosfato de cálcio. Portanto, a cada ciclo de cultivo, as plantas devem receber constantemente suplementação de P através de adubação química. Os fertilizantes fosfatados são tradicionalmente produzidos por tratamento químico em alta temperatura de rochas fosfáticas com ácido sulfúrico, um processo que apresenta riscos potenciais ao meio ambiente e não é economicamente viável devido ao alto consumo de energia. A apatita, uma rocha fosfática natural, é a principal fonte de fósforo, e cerca de 85% dela é consumida pela indústria de fertilizantes fosfatados. Marrocos tem as maiores reservas de fosfato bruto, e as maiores também foram criadas na China (45% da produção total de fosfato, 2018), nos EUA e na Rússia (TIMOFEEVA et al., 2023).

As perturbações no fluxo biogeoquímico de P devido à sua produção para uso agrícola excederam as margens de segurança para as atividades humanas. A FAO estabeleceu restrições à utilização de fertilizantes fosfatados contendo metais pesados, em particular cádmio, enquanto menos de um terço das reservas mundiais comprovadas de rochas fosfáticas são fosfatos com um teor inferior a 20 mg/kg. Deve-se também notar que o P é um recurso não renovável e os seus fornecimentos são limitados, criando preocupações sobre as suas fontes futuras. No entanto, apenas uma pequena quantidade de P adicional poderia ser utilizada, enquanto a maior parte dele é depositada no solo. Portanto, o uso generalizado de fertilizantes químicos à base de P tem um impacto negativo na fertilidade do solo, no desenvolvimento das plantas e na qualidade dos produtos agrícolas, bem como nos recursos hídricos, causando a sua eutrofização. Os problemas ambientais associados à fertilização chamam a atenção para a busca de abordagens alternativas para atender

às necessidades das plantas por P disponível (BOLAN et al., 1990; REDDY et al., 1999; ZAPATA & ROY, 2004; STAMFORD et al., 2007).

De janeiro a julho/2020 o Brasil consumiu aproximadamente 20 milhões de toneladas, registrando crescimento de 15,7% em relação ao ano 2019 (ANDA, 2021). O Brasil é um dos maiores consumidores de fosfatados do mundo, ocupando a terceira posição desde 2014, perdendo apenas para a China e a Índia, sendo também um grande importador mundial desse insumo (ANDA, 2021). Porém, a eficiência dos fertilizantes fosfatados varia de acordo com a composição do fertilizante aplicado, com a cultura utilizada e com as propriedades edáficas da região (CHIEN & MENON, 1995).

Na agricultura brasileira é muito comum o uso de fosfatados solúveis (NOVAIS et al., 2007). O uso de fertilizantes solúveis nos solos, aumenta rapidamente os teores de P disponíveis, o que favorece a absorção pelas plantas em sua fase inicial de desenvolvimento. Contudo essa alta solubilidade também favorece as reações de adsorção do P com o solo. Essas reações são mais intensas em solos bem intemperizados, onde, na fração argila, há predomínio de oxihidróxidos de ferro e alumínio; e de minerais 1:1, uma vez que o P da solução se ligará às superfícies desses minerais, que o tornará indisponível para as plantas (não lábil), devido à alta energia dessas ligações (SHEN et al., 2011). Outro fator preocupante no uso de fontes de P solúveis é o seu complexo e oneroso processo de produção.

A produção de fontes fosfatadas solúveis exige alta quantidade energia e grandes quantidades de reagentes químicos (ácido sulfúrico e/ou fosfórico), encarecendo muito seu custo e gerando passivos ambientais, como o residual de ácidos do processo químico de extração e descarte de rejeitos da mineração em grandes volumes no ambiente (CEKINSKI, 1990). Isso faz com que sejam buscadas fontes alternativas e mais eficientes, como o uso de concentrados de apatita, também designados como fosfatos naturais (BOLAN et al., 1990; REDDY et al., 1999; ZAPATA & ROY, 2004; STAMFORD et al., 2007).

Em um contexto global de preocupação com a finitude dos recursos fosfatados, a apatita representa uma fonte sustentável encontrada em diversas formações geológicas, incluindo rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. A diversidade de origens geológicas aumenta a disponibilidade desse recurso. Estudos indicam que concentrados de apatita podem aumentar os níveis de fósforo no solo, proporcionando resultados agrônômicos comparáveis aos fertilizantes solúveis. Essa eficiência agrônômica é essencial para garantir a produtividade das culturas (RAWASHDEH, 2020).

Em comparação com a produção de fosfatos solúveis, a extração e utilização de apatita concentra não apenas uma fonte mais acessível de P, mas também reduz os impactos ambientais associados aos processos químicos e descarte de resíduos da mineração. A dependência excessiva de fosfatos solúveis pode levar a problemas como adsorção no solo e altos custos de produção. A apatita oferece uma alternativa que pode ajudar a diversificar as fontes de fósforo na agricultura, contribuindo para práticas mais

sustentáveis e econômicas.

O manejo de P através do uso de apatita estão ganhando destaque nos últimos anos. Biswas et al (2022) examinaram a transformação de apatita em ao longo de um período de 10 anos, usando um conjunto de técnicas microscópicas e espectroscópicas baseadas em síncrotron. O fornecimento de P ao solo pelo concentrado de apatita ocorre dentro de meses através da dissociação organomineral e da desmineralização, contudo, esse fornecimento se torna maior em longos períodos de tempos. Os autores relataram que a alta resolução revelam uma decomposição microbiana dependente do estágio, dissolução de P e imobilização através da formação mineral secundário ao longo do tempo.

Zucareli et al. (2018) avaliando o crescimento e o desempenho produtivo do feijoeiro em resposta à aplicação isolada ou associada de fontes naturais e solúvel de fósforo, relataram que resultados semelhantes foram observados para o uso de fertilizantes solúveis e fosfatos naturais. Em eucalipto o fosfato natural reativo de Bayovar demonstrou eficiência similar ao uso de fertilizante fosfatado solúvel referência, podendo ser uma alternativa para a utilização na produção de mudas de eucalipto (DE SOUZA MAGALHÃES et al., 2017).

Telles et al. (2020) avaliando o uso desses materiais como alternativas para substituir os fosfatos solúveis de alto custo, relataram que as diferentes fontes utilizadas foram capazes de aumentar significativamente os teores de P lábil e moderadamente lábil no solo. Os mesmos autores, avaliaram a eficiência agrônômica em milho e também relataram crescimento semelhante em plantas adubadas com fontes naturais de fósforo e fertilizantes fosfatados solúveis.

Timofeeva et al. (2023) em um estudo de dois anos, analisou o uso de apatita combinado com vários microrganismos solubilizadores de P do gênero *Bacillus* para produção de azevém (*Lolium multiflorum*). Os autores relataram que o uso de concentrados de apatita incrementou o crescimento de azevém, porém a combinação do concentrado de apatita com microrganismos solubilizadores de P pode substituir fontes de P solúvel.

Nas últimas décadas, diante da possibilidade de os recursos fosfatados chegarem ao fim, têm sido publicados vários trabalhos indicando que esse recurso não duraria mais de 100 anos (STEEN, 1998; SMIL, 2000; CORDELL et al., 2009; FIXEN, 2009; ROSEMARIN et al., 2009; SMIT et al., 2009; VACCARI, 2009; COOPER et al., 2011; WITHERS et al., 2015). Alguns autores destacam que uma crise de fornecimento pode ocorrer nos próximos 50 anos (RAWASHDEH, 2020). Desta maneira é importante identificar novas fontes fosfatadas que possam auxiliar no manejo nutricional de P das culturas. Nesse sentido, insere-se a importância do uso dos concentrado de apatita. Apesar da baixa disponibilidade de fósforo na apatita de origem ígnea, atualmente o aumento da intensidade biológica dos sistemas produtivos e do manejo com bioinsumos aumenta o potencial destas fontes nos sistemas produtivos (FAGERIA et al., 2017; GULL et al., 2004; MUPONDI et al., 2018; SOUCHIE, 2005; TAKTEK et al., 2017).

A apatita, como fonte alternativa de P, desempenha um papel crucial na segurança

alimentar, fornecendo um recurso essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A sua utilização eficiente é vital para garantir a produtividade agrícola e a oferta de alimentos.

REFERÊNCIAS

- ANDA. Mercado de Fertilizantes Janeiro-Julho/2020. Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2021. Disponível em: <<https://anda.org.br/wp-content/uploads/2020/12/Comentarios.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2021
- BISWAS, P. P. et al. Sustainable phosphorus management in soil using bone apatite. *Journal of Environmental Management*, v. 305, p. 114344, 1 mar. 2022.
- BOLAN, N.; WHITE, R.; HEDLEY, M. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v. 30, p. 297–313, 1990.
- BRUMATTI, M. (2007). Mineralogia aplicada ao beneficiamento das zonas de xenólitos, Mina de Cajati, SP. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.3.2007.tde-28032008-175930. Recuperado em 2021-03-18, de www.teses.usp.br.
- CEKINSKI, E. Fertilizantes Fosfatados. In: CEKINSKI, E.; CALMONOVICI, C. E.; BICHARA, J. M.; FABIANI, M.; GIULIETTI, M.; CASTRO, M. L. M. M.; SILVEIRA, P. B. M.; PRESSIONOTTI, Q. S. H. C.; GUARDANI, R. (Ed.). *Tecnologia de Produção de Fertilizantes*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 95–129.
- CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fertilizer Research*, v. 41, p. 227–234, 1995.
- COOPER, J.; LOMBARDI, R.; BOARDMAN, D.; CARLIELL-MARQUET, C. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 57, p. 78–86, 2011.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, v. 19, p. 292–305, 2009.
- DERBY, O.A. The magnetite ore districts of Jacupiranga and Ipanema, São Paulo, Brazil. *American Journal of Science, Series 3, New Haven*, v. 141, p. 311-321. DE SOUZA MAGALHÃES, C. A.; MOURA MORALES, M.; ABREU REZENDE, F. Y.; LANGER, J. Eficiência de fertilizantes organominerais fosfatados em mudas de eucalipto. *Scientia Agraria*, 18:80-85, 2017.
- FAGERIA, N. K.; HE, Z.; BALIGAR, V. C. Phosphorus management in crop production. CRC Press., 374 p., 2017.
- FIXEN, P. E. World Fertilizer Nutrient Reserves- A View to the Future. In: *Better Crops with Plant Food*. v.93, p. 8–11, 2009.
- GULL, M.; HAFEEZ, F. Y.; SALEEM, M.; MALIK, K. A. Phosphorus uptake and growth promotion of chickpea by co-inoculation of mineral phosphate solubilizing bacteria and a mixed rhizobial culture. *Australian Journal of Experimental Agriculture, Collingwood*, v.44, n.6, p.623-628, 2004.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Boletim Técnico nº3, Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo., v. 10, p. 1–10, 1997.

KLEIN, C. & DUTROW, B. Manual de Ciência dos Minerais, 23a ed. Bookman, 2012. 716 p.

KPOMBLEKOU-A, K.; TABATABAI, M. A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 100, p. 275–284, 2003.

KRASNOVA, N. I.; PETROV, T. G.; BALAGANSKAYA, E. G.; GARCIA, D.; MOUTTE, J.; ZAITSEV, A. N.; Wall, F. Introduction to phoscorites: occurrence, composition, nomenclature and petrogenesis. In Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province (Vol. 10, pp. 45–74), 2004. Mineralogical Society London.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MELCHER, G.C. O carbonatito de Jacupiranga. Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. Ser. Geologia, São Paulo, n. 21, p. 175, 1965.

NOVAIS, R. F. de; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. DE; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. DE; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471–537.

TIMOFEEVA, T.A.; CHEBOTAR, V.K.; DEMIDOV, D.V.; GAIDUKOVA, S.E.; YAKOVLEVA, I.V.; KAMIONSKAYA, A.M. Effects of Apatite Concentrate in Combination with Phosphate-Solubilizing Microorganisms on the Yield of Ryegrass Cultivar Izorskiy. Agronomy 2023, 13, 1568. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061568>

RAWASHDEH, R. World peak potash: An analytical study. Resources Policy, 69, 101834, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101834>

REDDY, D. D.; RAO, A. S.; REDDY, K. S.; TAKKAR, P. N. Yield sustainability and phosphorus utilization in soybean-wheat system on Vertisols in response to integrated use of manure and fertilizer phosphorus. Field Crops Research, v. 62, p. 181–190, 1999.

ROSEMARIN, A.; DE BRUIJNE, G.; CALDWELL, I. The next inconvenient truth: Peak phosphorus. The Broker, p. 1–6, 2009.

RUBERTI, E.; MARGUTI, R.L.; GOMES, C.B. O Complexo Carbonatítico de Jacupiranga, SP: informações gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. Roteiro das excursões. São paulo: SBG, 1992. v.4, 16 p.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. Plant physiology, v. 156, p. 997–1005, 2011.

SMIL, V. Phosphorus in the environment: Natural Flows and Human Interferences. Annual Review of Energy and the Environment, v. 25, p. 53–88, 2000.

SMIT, A. L.; BINDRABAN, P. S.; SHROEDER, J. J.; CONIJIN, J. G.; G, V. D. M. H. Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. Plant Research International, 2009. 36p.

SOUZA, A.E.; FONSECA D.S. Fosfato. In: Rodrigues A.F.S. (coord.). Economia Mineral do Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, p. 546-568, 2009.

STAMFORD, N. P.; SANTOS, P. R.; SANTOS, C. E. S.; FREITAS, A. D. S.; DIAS, S. H. L.; LIRA, M. A. Agronomic effectiveness of biofertilizers with phosphate rock, sulphur and *Acidithiobacillus* for yam bean grown on a Brazilian tableland acidic soil. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 1311–1318, 2007.

STEEN, I. Phosphorus availability in the 21st Century: management of a non- renewable resource. *Phosphorus and Potassium*, v. 217, p. 25–31, 1998.

SOUCHIE, E. L. Solubilização de fosfatos em meios sólido e líquido por bactérias e fungos do solo. *Revista Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.40, n.11, p.1149-1152, nov. 2005.

TAKTEK, S.; ST-ARNAUD, M.; PICHÉ, Y.; FORTIN, J. A.; ANTOUN, H. Igneous phosphate rock solubilization by biofilm-forming mycorrhizobacteria and hyphobacteria associated with *Rhizoglossum irregulare* DAOM 197198. *Mycorrhiza*, 27(1), 13–22, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0726-z>

TELES, A. P. B.; RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S. Solubility and Efficiency of Rock Phosphate Fertilizers Partially Acidulated with Zeolite and Pillared Clay as Additives. *Agronomy-Basel*, 10:918, 2020.

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. APATITA – $(Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl))$. Versão dez/2020. Acesso em 15/03/2021 <<https://www.ufrgs.br/minmicro/Apatita.pdf>>.

VACCARI, D. A. Phosphorus: A Looming. *Scientific American*, p. 54–59, 2009. Disponível em: <<http://web.mit.edu/12.000/www/m2016/pdf/scientificamerican0609-54.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2018

WITHERS, P. J. A.; VAN DIJK, K. C.; NESET, T. S. S.; NESME, T.; OENEMA, O.; RUBÆK, G. H.; SCHOUmans, O. F.; SMIT, B.; PELLERIN, S. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: The case of Europe. *Ambio*, v. 44, p. 193–206, 2015.

ZAPATA, E.; ROY, R. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. *Fertilizer and plant nutrition bulletin* 13. Rome: FAO, 2004.

ZUCARELI C.; BARZAN R. R.; SILVA J. B.; CHAVES D. P. Associação de fosfatos e inoculação com *Bacillus subtilis* e seu efeito no crescimento e desempenho produtivo do feijoeiro. *Rev. Ceres*, 65: 189-195, 2018.