



Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas - uma revisão

Emanuelle Valeska Bilhar ARAÚJO ¹, Cláudia MAJOLA ^{*1}, Ithalo Gomes de LIMA ²,
Jessica Pinheiro dos SANTOS ¹, Aleksander Westphal MUNIZ ¹

¹ Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Brasil.

² Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil.

*E-mail: claudia.majolo@embrapa.br

Submetido em: 07/05/2024; Aceito em 23/11/2024; Publicado em: 21/12/2024.

RESUMO: O fósforo e o potássio são elementos químicos essenciais no ciclo de vida das plantas e são considerados fatores limitantes para o desenvolvimento da agricultura. Anualmente, muitos fertilizantes comerciais são aplicados em campo para atender às exigências e à alta demanda da produção vegetal, mas a baixa eficiência de aproveitamento desses insumos pode gerar impactos negativos ao meio ambiente. Quando aplicados no solo, esses elementos são rapidamente fixados em minerais de argila por meio de reações químicas, o que dificulta sua absorção pelas raízes das plantas. Como alternativa ao uso intensivo de insumos químicos, muitas pesquisas estão sendo direcionadas para o emprego de bactérias que habitam a rizosfera e possuem a capacidade de biodisponibilizar macronutrientes insolúveis. Diante disso, o objetivo deste estudo é realizar uma revisão da literatura sobre as bactérias solubilizadoras de fosfatos e potássio, seus mecanismos de ação e seu uso como bioinoculantes. Os artigos científicos foram selecionados de acordo com a proposta deste trabalho, por meio de bancos de dados como Web of Science, SciELO, Google Scholar, Periódico Capes e Scopus. Esta revisão apresenta resultados relevantes sobre o uso e a multifuncionalidade das rizobactérias, mostrando-as como uma estratégia de baixo custo e aplicabilidades ecológicas diversas, que promove a sustentabilidade agrícola.

Palavras-chave: macronutrientes; microrganismos; biodisponibilização.

Solubilization of phosphates and potassium by rhizospheric bacteria – a review

ABSTRACT: Phosphorus and potassium are essential chemical elements in the plant life cycle and are considered limiting factors for agricultural development. Every year, many commercial fertilizers are applied in the field to meet the demands of high crop production; however, the low efficiency in nutrient uptake can lead to negative environmental impacts. When applied to the soil, these elements are quickly fixed in clay minerals through chemical reactions, making their absorption by plant roots more difficult. Much research is focused on employing rhizosphere-dwelling bacteria capable of bioavailable insoluble macronutrients as an alternative to intensive use of chemical inputs. Therefore, this study aims to conduct a literature review on phosphate- and potassium-solubilizing bacteria, their action mechanisms, and their use as bioinoculants. Scientific articles were selected according to the purpose of this work through databases such as Web of Science, SciELO, Google Scholar, Capes Journals, and Scopus. This review presents relevant findings on the use and multifunctionality of rhizobacteria, showcasing them as a low-cost strategy with diverse ecological applications that promote agricultural sustainability.

Keywords: macronutrients; microorganisms; bioavailability.

1. INTRODUÇÃO

Os solos tropicais, predominantes no Brasil, são caracterizados pela elevada concentração de alumínio, acidez, ausência de nutrientes minerais e a sensibilidade ao manejo antropogênico inadequado, que ocasionam áreas degradadas e improdutivas (FREIRE et al., 2021; CARVALHO JUNIOR et al., 2022).

A fertilidade do solo é um fator determinante para o aumento da produtividade de muitas culturas, fornecendo nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, como o Nitrogênio (N), o Fósforo (P), o Potássio (K), o Cálcio (Ca), o Magnésio (Mg) e o Enxofre (S), esses elementos químicos são exigidos em grandes quantidades pela planta e participam

de diferentes processos metabólicos (BARKER; PILBEAM, 2015; MELLO; MENDONÇA, 2017).

Contudo, boa parte desses nutrientes não estão disponíveis às plantas e precisam ser mineralizados ou solubilizados para que possam ser absorvidos pelas raízes. Para suprir as necessidades básicas das plantas e alcançar sua produtividade máxima, são aplicados anualmente uma grande quantidade de formas solúveis desses macronutrientes em forma de fertilizantes químicos (ZONTA et al, 2021).

Uma vez no solo, os fertilizantes são facilmente precipitados em formas insolúveis, sendo o fósforo um exemplo claro desse desafio. Este elemento é altamente complexo e de fácil fixação, cerca de 90% do fósforo aplicado

na forma de fertilizante é adsorvido pelas frações do solo já na primeira hora após a aplicação. Esse comportamento resulta em adubações excessivas e ineficientes (MELLO; MENDONÇA, 2017).

Nesse contexto, diversas pesquisas buscam formas alternativas para disponibilizar nutrientes insolúveis presentes no solo, tanto em formas orgânicas quanto inorgânicas. Entre essas alternativas, destaca-se o uso de biofertilizantes. Certos microrganismos, como bactérias e fungos, possuem a capacidade de solubilizar nutrientes como fósforo e potássio por meio da produção de ácidos orgânicos, liberação de prótons e redução do pH (RAWAT et al, 2021; KOCZORSKI et al., 2023).

Os gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter* e *Burkholderia*, representam o principal grupo de agentes solubilizadores, assim com os fungos dos gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* (GOMES et al., 2014; ETESAMI; MAHESHWARI, 2018; KALAYU, 2019). A produção de inoculantes a partir desses microrganismos representam um baixo custo, além de uma alternativa eficaz e sustentável (KALAYU, 2019; OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado a partir de uma revisão sistemática de artigos científicos, por meio das bases de dados Web Science, Scielo, Google Scholar, Periódico Capes e Scopus. As palavras-chave utilizadas foram “phosphates and potassium”, “solubilizing microorganisms” e “solubilization mechanisms”. As fases da revisão seguiram metodologia do grupo Prisma, conforme figura 1, e o período delimitado foi de 2014 a 2024, tendo em vista os últimos 10 anos do cenário de bioinsumos (MOHER et al., 2009).

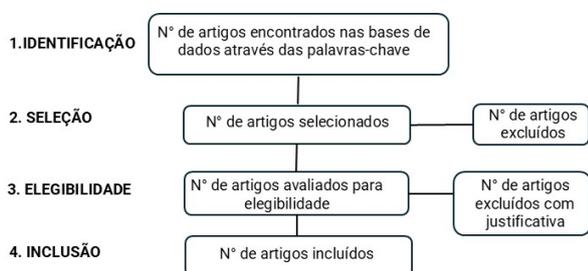


Figura 1. Fluxograma de fases da revisão sistemática.
Figure 1. Systematic review flowchart.

A primeira etapa consistiu na identificação de artigos por meio de palavras-chave e leitura dos títulos. Muitos artigos selecionados se repetiam entre as bases de dados e, por isso, foram excluídos. Um número menor de estudos foi selecionado para a etapa de elegibilidade, na qual seus resultados e conclusões foram analisados. Os estudos excluídos não atenderam aos objetivos da pesquisa, enquanto os restantes foram incluídos nesta revisão.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Fósforo

O fósforo (P) é um macronutriente primário indispensável nos processos metabólicos das plantas, e atuam na transferência de energia, divisão celular, na transdução de sinais e na fotossíntese, além de desempenhar um papel na respiração e na biossíntese de ácidos nucleicos e outros compostos, como o amido (HAWKESFORD et al., 2023; MELLO; MENDONÇA, 2017).

O P é sujeito a inúmeros processos e fatores que alteram sua disponibilidade, como as características físico-químicas do solo. Em condições ácidas (pH 2-5) os minerais oxidados de carga positiva se ligam ao fósforo formando grupos fosfatos, em condições neutras o fósforo tende a se ligar a fração argila através de ligações químicas e sob condições alcalinas o fósforo é precipitado por cátions divalentes (NATH et al., 2024; PEREIRA et al., 2021; FREIRE et al., 2021; HANYABUI et al., 2020).

O fósforo é encontrado tanto na forma orgânica, a partir de resíduos animais e vegetais, como na forma inorgânica, presente em fertilizantes químicos e frações minerais do solo, isso ocorre pois o P possui grande capacidade de fixação ao ligar-se a outros elementos carregados, formando fosfatos insolúveis como o fosfato de cálcio, fosfato de ferro e fosfato de alumínio (Figura 2) (NATH et al., 2024; MADRID-DELGADO et al., 2021; ZHANG et al., 2022).

3.2. Potássio

Assim como o fósforo, o potássio é considerado um macronutriente essencial. Ele desempenha papéis fundamentais em processos como a osmose, o equilíbrio iônico, a abertura e o fechamento dos estômatos, a ativação de enzimas como cofator, a manutenção do pH e a absorção de nitrogênio (FAGERIA, 2015; MELLO; MENDONÇA, 2017). A deficiência desse elemento implica na síntese de proteínas e de amido, alguns sintomas são observados nas folhas mais velhas, com posterior clorose e lesões necróticas, redução de altura e suscetíveis ataques de patógenos (PAULILO et al., 2015).

O potássio é um elemento abundante no solo, mas sua forma solúvel, íon K^+ , é bastante limitada para absorção pelas plantas (MOSTOFA et al., 2022). Esse elemento pode estar presente no solo em cinco formas distintas, associadas a minerais como feldspatos, micas, muscovitas, biotitas ou argilas: (I) Potássio estrutural- um constituinte dos minerais do solo, indisponível e liberado por intemperismo; (II) Potássio trocável- ligado à cargas negativas, como as da argila, mas prontamente disponível para absorção quando necessário; (III) Potássio na solução do solo- dissolvido na água do solo e facilmente absorvido pelas plantas; (IV) Potássio não trocável- presente nas porções internas das partículas de argila, o que o torna um elemento indisponível; (V) Potássio fixado- presente nos organominerais, indisponível para absorção direta e liberado sob condições específicas (Figura 3) (MELLO; MENDONÇA, 2017).

3.3. Bactérias solubilizadoras de fosfatos e potássio inorgânico

Determinados grupos microbianos presentes na rizosfera, como bactérias e fungos, são capazes de participar da mineralização e solubilização de nutrientes, como fosfatos, potássio e zinco (RATHOD et al., 2024; REHMAN et al., 2021). As populações de microrganismos incluídas neste processo são influenciadas pelas condições físicas, químicas e biológicas do solo, incluindo as modificações antrópicas recorrentes da atividade agrícola (CAVALCANTE et al., 2023).

O fosfato inorgânico (P-Ca, P-Al e P-Fe) e o potássio podem ser convertidos em sua forma solúvel através de bactérias associadas à promoção de crescimento de plantas (ALIYAT et al., 2022). Alguns dos principais gêneros bacterianos com potencial solubilização de minerais são: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, entre outros (MINUT et al., 2022; FAHDE et al., 2023) (Tabela 1).



Figura 2. Ciclo do Fósforo.
Figure 2. Phosphorus Cycle.

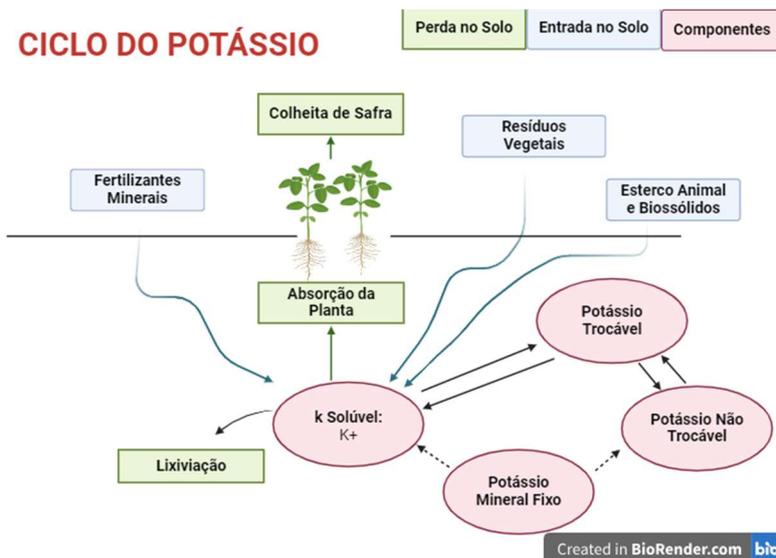


Figura 3. Ciclo do Potássio.
Figure 3. Potassium Cycle.

A aplicação de bactérias com ação benéfica antes da semeadura é uma prática comum em culturas como a soja e o milho, inoculadas sozinhas ou em conjunto de fertilizantes químicos, como uma ação preventiva que potencializa a promoção de crescimento, rendimento e outros efeitos em campo (GUIMARÃES, et al, 2023; PEREIRA et al., 2020; PATIL et al., 2023; MEYER et al., 2022).

A biofertilização com as bactérias *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*, aliada a doses reduzidas de fertilizantes químicos, aumenta a produtividade da soja, alcançando resultados comparáveis à aplicação total recomendada de adubos químicos para a cultura (GUIMARÃES et al., 2023),

A inoculação combinada de bactérias *Pseudomonas* spp. e *Bacillus* spp. potencializa a solubilização de fosfatos e reduz os gastos com aplicações de fertilizantes químicos, seus efeitos são observados no crescimento da planta, na massa seca e no teor de P da folha, sem a necessidade de adição de adubação fosfatada (MAZZUCO et al., 2023).

A inoculação de sementes com bactérias solubilizadoras de potássio aumenta os índices de germinação, vigor, crescimento e principalmente rendimento, tanto em casa de vegetação quanto em campo (ETESAMI et al, 2017).

Os isolados de *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium* têm sido relatados por sua capacidade de extrair potássio do feldspato, produzir ácido indolacético e exopolissacarídeos (EPS), além de solubilizar fósforo (P) in vitro. Os resultados sugerem o potencial desses microrganismos para substituir os insumos químicos por biofertilizantes (ANJANADEVI et al., 2016).

Em morangueiros inoculados com *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*, em condições experimentais e sob diferentes fontes de potássio, foi observado um aumento nos teores de potássio solúvel no solo, evidenciando a habilidade desse gênero na solubilização desse nutriente (ASSUNÇÃO et al., 2024).

Tabela 1. Bactérias solubilizadoras de fosfato e potássio.
Table 1. Phosphate and potassium solubilizing bacteria.

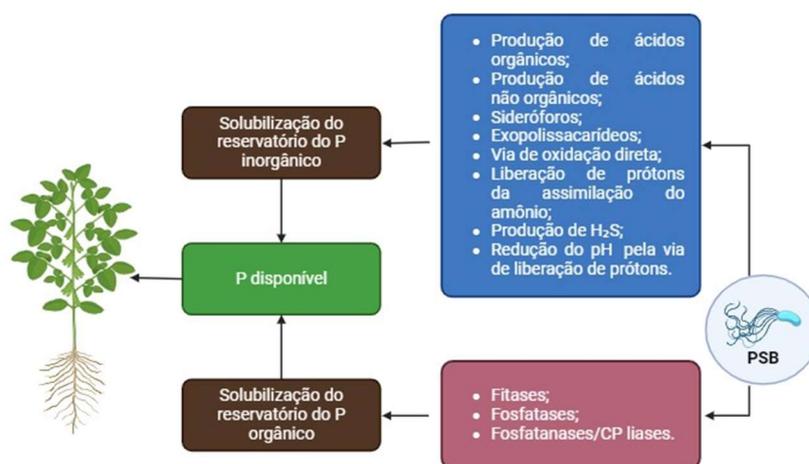
Bactérias	Solubilização	Referências
<i>Bacillus velezensis</i> ; <i>B. megaterium</i> ; <i>Herbaspirillum buttiense</i>	Fosfato tricálcico	Abbas et al., 2024a
<i>B. megaterium</i> ; <i>B. subtilis</i>	Fosfato de cálcio	Iqbal et al., 2024
<i>B. subtilis</i>	Fosfato de cálcio, Potássio (Silicato de alumínio e potássio)	Rathod et al., 2024
<i>Rhizobium</i> spp.	Fosfato de cálcio	Sarmiento et al., 2024
<i>Microbacterium</i>	Fosfato de cálcio	Gao et al., 2024
<i>Agrobacterium deltaense</i>	Fosfato tricálcico	Chang et al., 2024
<i>Pseudomonas</i> spp: <i>P. aurantiaca</i> ; <i>P. chlororaphis</i> ; <i>P. fluorescens</i> .	Potássio (K_2HPO_4 , KNO_3 , K_2CO_3 , KCl e NPK [(20:20:20), SoluPlant])	Abbas et al., 2024b
<i>Burkholderia terrortii</i> .	Fosfato tricálcico	Asril et al., 2023
<i>Paraburkholderia</i> spp.	Fosfato de alumínio, fosfato de ferro, fosfato tricálcico, monofosfato de cálcio,	Xu, Lv e Yu, 2023
<i>Bacillus megaterium</i> , <i>B. aryabhattai</i> ; <i>B. mycoides</i> ; <i>Erwinia</i> sp; <i>Rhizobium</i> spp; <i>Streptomyces</i> spp.; <i>Pantoea agglomerans</i> ; <i>Paenibacillus</i> spp.; <i>Caballeronia glathei</i> ; <i>Serratia</i> spp.	Fosfato tricálcico, Cloreto de cálcio	Koczorski et al., 2023
<i>Pseudomonas</i> ; <i>Serratia</i> ; <i>Pantoea</i> ; <i>Enterobacter</i> .	Fosfato de ferro, fosfato de alumínio, fosfato de tricálcico e potássio (mica)	Aliyat et al., 2022
<i>Azospirillum</i> sp.	Fosfato natural de Araxá ($Ca_{10}(PO_4)_6F_2$) e fosfato tricálcico	Rodrigues et al., 2022

3.4. Mecanismos de ação de bactérias solubilizadoras de minerais inorgânicos

A conversão de minerais orgânicos e inorgânicos em suas formas solúveis ocorre por meio mecanismos distintos: a mineralização de compostos orgânicos e a solubilização de compostos inorgânicos. O primeiro processo ocorre pela produção de enzimas como fitases, fosfatases, fosfonatases e

C–P liases. O segundo envolve uma série de estratégias, incluindo a produção de ácidos orgânicos e inorgânicos, sideróforos, exopolissacarídeos, via de oxidação direta, redução de pH, liberação de prótons pela assimilação de amônia, entre outros métodos indiretos (Figura 4) (RAWAT et al., 2021).

846



Created in BioRender.com b10

Figura 4. Mecanismos bacterianos de solubilização de Fosfatos. Adaptado de Rawat et al. (2021).
Figure 4. Bacterial mechanisms of phosphate solubilization. Adapted from Rawat et al. (2021).

Os mecanismos envolvidos na solubilização dos fosfatos em testes *in vivo* podem ser diferentes dos observados nos testes *in vitro*. No solo a microbiota utiliza mais de um processo na conversão do fósforo insolúvel, visto que essas estratégias não atuam de forma independente (MASSENSINE et al, 2015).

O potencial de solubilização é estabelecido pela capacidade de liberação de ácidos orgânicos, e esse mecanismo é considerado o mais eficiente na

disponibilização dos nutrientes pelas bactérias, entre os ácidos orgânicos secretados estão os ácidos glutâmicos, glucônicos, pirúvicos, oxálicos, maleicos, málicos, fumáricos, acéticos, lácticos, tartáricos, cítricos e fórmicos (ALMEIDA LEITE et al., 2024; LEITE et al., 2020; WEI et al., 2018).

Os ácidos orgânicos são compostos polares de baixo peso molecular que possuem um ou mais grupos carboxilas (ALMEIDA LEITE et al., 2024). Esses ácidos agem por meio de quatro processos que culminam na solubilização do

fósforo. O primeiro é a redução do pH pela liberação de prótons; o segundo é o aumento da quelação de cátions ligados aos fosfatos; o terceiro envolve a formação de complexos com íons metálicos associados ao fósforo; e o quarto é a competição do ácido com o fósforo pela adsorção (WEI et al., 2018; ADELEKE et al. 2017).

O potencial quelante dos ácidos orgânicos excretados no ambiente é um dos principais processos associados à capacidade de solubilização de minerais contendo fósforo, potássio, ferro e magnésio. A quelação envolve uma ligação forte entre os ácidos orgânicos e os cátions, facilitando a precipitação do fosfato. Esse processo converte os íons em formas solúveis, promovendo a disponibilidade de nutrientes para as plantas (ADELEKE et al., 2017; ALMEIDA LEITE et al., 2024).

Filtriati et al. (2022) concluíram que a bactéria *Burkholderia* solubilizou mais compostos fosfatados e produziu maiores quantidades de ácidos orgânicos, como o ácido láctico e o ácido cítrico, em condições ácidas (pH 4,5) do que em condições básicas (pH 7) ou alcalinas (pH 10,5). A redução do pH, e consequentemente a acidólise, é considerada um dos fatores determinantes na disponibilização de alguns nutrientes, como observado por Nath et al (2017), em que o aumento da acidez total resultou em uma maior concentração de potássio (K) liberado. No entanto, é importante frisar que nem sempre a acidificação está diretamente associada à quantidade de nutrientes solubilizados.

Os ácidos inorgânicos também são utilizados na solubilização de nutrientes, embora sejam menos eficazes do que os ácidos orgânicos. Entre eles, destacam-se o ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico e ácido carbônico (RAWAT et al., 2021). Exemplos disso são as bactérias *Acidithiobacillus thiooxidans* e *A. ferrooxidans*, que oxidam o ferro e o enxofre ferroso ao produzir ácido sulfúrico. O ferro é bastante encontrado unido ao fósforo e por isso esse composto pode ser utilizado na solubilização do fosfato, o ácido sulfúrico também apresenta capacidade de solubilizar a hidroxiapatita, um fosfato de rocha (WYCISZKIEWICZ et al., 2017).

A escassez de fosfato impulsiona outra estratégia de solubilização, causada pela mudança da via da fosforilação para oxidação direta da glicose a ácido glucônico, por uma enzima desidrogenase (GDH), esse processo resulta na alta acidificação do ambiente extracelular e posteriormente na solubilização de Pi (TIMOFEEVA et al, 2022).

O ácido glucônico é o principal ácido orgânico envolvido na solubilização do fósforo. Durante a reação química da via de oxidação direta que gera esse composto, prótons (H^+) são liberados no meio. Parte desses prótons é utilizada no metabolismo energético das bactérias, enquanto o restante é liberado no ambiente, contribuindo para a dissolução do fósforo. A extrusão de H^+ reduz o pH do solo, o que é crucial para a biodisponibilização contínua de macronutrientes essenciais (ALORI et al., 2017; MAHARANA; DHAL, 2022).

A solubilização do fósforo na ausência de produção de ácidos pode ocorrer pela liberação de prótons, por meio da respiração ou da assimilação de NH_4^+ , que são formas alternativas de dissolução do fósforo. A assimilação de amônia pelas bactérias visa à síntese de aminoácidos. No interior do organismo bacteriano, o NH_4^+ é convertido em NH_3 , resultando na liberação de prótons no citoplasma, o

que auxilia na redução do pH do solo e na solubilização de nutrientes (RAWAT et al., 2021).

Algumas bactérias produzem moléculas chamadas sideróforos, que têm alta afinidade pelo ferro. Os íons de Fe apresentam maior atração por compostos produzidos por bactérias do que por fungos. Acredita-se que, devido a essa forte quelação, os sideróforos possam participar indiretamente da disponibilização do fósforo em complexos Fe-P, contribuindo para o aumento da fertilidade e produtividade do solo (AZNAR; DELLAGI, 2015; TIMOFEEVA et al., 2022).

Diferentemente do fosfato de cálcio, que é solubilizado em faixas de pH entre 2,5 e 4,0, a solubilização do fosfato de ferro é mais difícil, ocorrendo apenas em pH entre 2,0 e 2,5. Embora a acidificação seja eficaz na solubilização do complexo Ca-P, ela não deve ser considerada o mecanismo primário para o Fe-P. Os níveis de pH extremamente baixos exigidos dificultam a dissolução por ácidos orgânicos. Assim, a solubilização do fosfato de ferro pode ser atribuída à quelação do ferro e, consequentemente, à liberação do fósforo, mediada pelos sideróforos (CUI et al., 2022).

Além dos mecanismos mencionados, existem substâncias ácidas de origem inorgânica que também desempenham um papel na solubilização, como os exopolissacarídeos (EPS). Esses compostos auxiliam na formação de biofilmes, facilitando o aprisionamento de nutrientes (DEY et al., 2021).

Bactérias que produzem EPS apresentam maior capacidade de solubilização, e a atuação desses compostos pode ser observada na bioadsorção de metais, resultando na solubilização de fosfatos metálicos. Os EPS também colaboram com os ácidos orgânicos por meio de um sinergismo, potencializando a liberação de fósforo (P), e promovendo modificações na homeostase da planta, o que ajuda a protegê-la contra estresses abióticos. Além disso, incentivam a comunidade microbiana a sair do estado de estabilidade, promovendo a solubilização de mais fosfatos (DEY et al., 2021).

Essas moléculas poliméricas, compostas principalmente por carboidratos, são importantes para a desagregação de organominerais e para a fertilidade do solo, pois alteram a rizosfera, criando um biofilme que auxilia na agregação microbiana, na interação planta-microrganismo, na manutenção da umidade e no acúmulo de açúcares e nutrientes (MAHMOOD et al., 2016; NASEEM et al., 2018).

Os mecanismos utilizados para a solubilização potássio seguem os mesmos princípios dos fosfatos, e dividem-se em: (I) Mecanismos diretos; (II) Mecanismos indiretos; (III) Liberação de polissacarídeos; e (IV) Formação de biofilme em superfícies minerais. Entre os mecanismos diretos têm-se a produção de ácidos orgânicos, a redução do pH, também chamada de acidólise, liberação de íons H^+ e o intemperismo mediado pelo ácido carbônico, que resulta na formação de íons quelantes na solução do solo (SATTAR et al., 2019; KOUR et al., 2020).

Os mecanismos indiretos incluem a quelação dos cátions ligados ao silicato de potássio, a solubilização por ligação direta em superfícies minerais, ligantes complexantes de metal, como o ácido gulurônico, e a liberação de fitohormônios pelas bactérias (SATTAR et al., 2019).

3.5. Aplicação de bioinoculantes

A utilização de bioinoculantes é uma alternativa viável e de baixo custo para auxiliar na absorção de nutrientes,

especialmente por meio da solubilização de fosfatos e potássio, sem causar impactos ambientais. Além disso, esses produtos promovem o desenvolvimento e aumentam o rendimento das culturas agrícolas.

Entre os bioinoculantes, destaca-se o BiomaPhos®, o primeiro biofertilizante solubilizador de fósforo desenvolvido no Brasil. Essa tecnologia foi criada pela Embrapa Milho e Sorgo em parceria com a empresa Bioma Company e combina as cepas *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*, reconhecidas por sua eficiência na solubilização de fósforo (VELLOSO et al., 2020).

No trabalho de Oliveira et al., (2020), foi realizado uma análise econômica a partir da aplicação do inoculante BiomaPhos® em safras de milho e soja, que apontaram um aumento de produtividade média de 8,6% (11,9 % sacas/ha)

para a cultura do milho e 6,3 % (4,3 sacas/ha) para a cultura da soja. A relevância dos bioinoculantes também se reflete na redução de custos, permitindo uma economia de cerca de 33% a 50% em comparação com o uso de fertilizantes químicos. Essa economia proporciona aos agricultores ganhos significativos na produção, além de lucros mais elevados em suas plantações (OLIVEIRA et al., 2020).

Os biofertilizantes possuem uma ampla expansão no mercado nacional e internacional e sua projeção é de 10% ao ano, com destaque para o continente Europeu, a base dos produtos inoculados, no entanto, não apresenta diversificação e são produzidos utilizando rizóbios, organismos solubilizadores de fosfatos e promotores de enraizamento, como o Azospirillum, conforme Tabela 2 (BRASIL, 2021).

Tabela 2. Biofertilizantes com aplicação na solubilização de fosfatos e potássio.

Table 2. Biofertilizers with application in the solubilization of phosphates and potassium.

Organismo	Insumo biológico: Fabricante	Efeito	Cultura
<i>Bacillus megaterium</i> e <i>Bacillus subtilis</i>	Bioma PHOS: Embrapa e Bioma (Brasil)	Solubilização de fósforo, aumento da produtividade	Milho e soja
<i>Azospirillum brasilense</i> e <i>Pseudomonas fluorescens</i>	BioFree: Biotrop (Brasil e Bélgica)	Solubilização de fósforo e nitrogênio, aumento da produtividade	Milho, soja e arroz
<i>Azospirillum brasilense</i>	Azos Siembra: Fertibio do Brasil (Brasil)	Aumento da produtividade, sistema radicular, absorção de nutrientes	Milho
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Siembra PhosPro: Fertibio do Brasil (Brasil)	Solubilização de fósforo, redução de patógenos, aumento da nodulação e produtividade	Diferentes Culturas
<i>Bacillus amyloliquefa-ciens</i> e <i>Trichoderma virens</i>	QuickRoots® Technology: Acceloron e Merck (USA)	Fixação de nitrogênio e solubilização de Fosfato e Potássio	Milho
<i>Bradyrhizo-bium japonicum</i> e <i>Penicillium bilaiae</i>	Tag Team® Technology: Acceloron e Merck (USA)	Fixação de nitrogênio e solubilização de Fosfato	Soja
<i>Frateruia sp.</i>	Simbion K: T.Stanes & Company Limited (India)	Solubilização de potássio	Diferentes Culturas
<i>Frateruia aurantia</i>	PotaZ: Varsha Bioscience and Technology India Private (India)	Solubilização de potássio	Diferentes Culturas

3.6. Sustentabilidade agrícola

O solo exerce um papel fundamental na produção vegetal, e a manutenção de suas qualidades é essencial para criar condições favoráveis ao estabelecimento e desenvolvimento de culturas agrônomicas (MELLO et al., 2019)

A agricultura intensiva, com o objetivo de acelerar e aumentar a produtividade vegetal, utiliza métodos antropogênicos para maximizar a produção, como a aplicação de herbicidas, inseticidas, fungicidas e fertilizantes. Contudo, o uso indiscriminado dessas práticas degrada os sistemas agrícolas, causando poluição, eutrofização e reduzindo a qualidade do solo a longo prazo (CUI et al., 2020).

De acordo com Cherubin et al., (2015), a aplicação de fertilizantes minerais (NPK) durante três anos consecutivos na produção de grãos leva à redução da qualidade das características físicas do solo, resultando em compactação e diminuição da porosidade, condições críticas para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas cultivadas. As questões ambientais associadas ao uso excessivo de insumos químicos abrem um leque de possibilidades para o uso de produtos de base biológica e ecologicamente viáveis.

Os microrganismos atrelados ao aumento da produtividade são uma alternativa eficiente para substituir os

fertilizantes químicos devido sua capacidade de solubilização de macronutrientes, além de estarem envolvidos em outras séries de benefícios aos cultivos, como o crescimento da planta, aumento da capacidade de absorção de água, resistência ao estresse hídrico, dentre outros (DOS REIS et al., 2024; VERMA; WHITE, 2018; RAMAKRISHNA et al., 2019; ALIYAT et al., 2020).

A multifuncionalidade das bactérias rizosféricas, diante das dificuldades na manutenção do solo e da indisponibilidade de alguns nutrientes, torna sua aplicação vantajosa. O uso de bioinoculantes é considerado eficiente e, sobretudo, representa uma estratégia ambientalmente correta para melhorar o aproveitamento dos nutrientes e a fertilidade do solo (GUIMARÃES et al., 2021).

5. CONCLUSÕES

O uso de inoculantes com capacidade de solubilizar minerais indisponíveis para as plantas é considerado eficiente, além de ser uma alternativa viável tanto econômica quanto ambientalmente, especialmente em solos predominantemente ácidos e com alta capacidade de adsorção. As bactérias promotoras de crescimento de plantas, além de atuarem na solubilização de fosfatos e potássio, também utilizam estratégias como fixação de nitrogênio,

biorremediação, biolixiviação e antagonismo contra fitopatógenos. Assim, exercem múltiplos papéis simultaneamente, contribuindo para a sustentabilidade do solo.

6. REFERÊNCIAS

- ABBAS, M. M.; ISMAEL, W. H.; MAHFOUZ, A. Y.; DAIGHAM, G. E.; ATTIA, M. S. Efficacy of endophytic bacteria as promising inducers for enhancing the immune responses in tomato plants and managing *Rhizoctonia* root-rot disease. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1331, 2024a. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51000-8>
- ABBAS, S. R.; SHAHID, I.; JAVED, M.; MALIK, K. A.; MEHNAZ, S. Contribution of mineral mobilizing fluorescent pseudomonads in growth promotion of rice (*Oryza sativa* L.) in nutrient deficient soil. **South African Journal of Botany**, v. 166, p. 88-96, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.01.023>
- ADELEKE, R.; NWANGBURUKA, C.; OBOIRIEN, B. Origins, roles and fate of organic acids in soils: A review. **South African Journal of Botany**, v. 108, p. 393-406, 2017.
- ALI, S. S.; VIDHALE, N. N. Bacterial siderophore and their application: a review. **International Journal Current Microbiology Applied Science**, v. 2, n. 12, p. 303-312, 2013. <https://doi.org/10.2174/1874467213666200518094445>
- ALIYAT, F. Z.; MALDANI, M.; EL GUILLI, M.; NASSIRI, L.; IBIJBIJEN, J. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from phosphate solid sludge of the Moroccan phosphate mines. **The Open Agriculture Journal**, v. 14, n. 1, p. 16-24, 2020. <https://doi.org/10.2174/1874331502014010016>
- ALIYAT, F. Z.; MALDANI, M.; EL GUILLI, M.; NASSIRI, L.; IBIJBIJEN, J. Phosphate-Solubilizing bacteria isolated from phosphate solid sludge and their ability to solubilize three inorganic phosphate forms: calcium, iron, and aluminum phosphates. **Microorganisms**, v. 10, n. 5, e980, 2022. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050980>
- ALMEIDA LEITE, R. de; DA COSTA, E. M.; MICHEL, D. C.; LEITE, A. do A.; LONGATTI, S. M. de O.; LIMA, W. de; KONSTANTINIDIS, K. T.; MOREIRA, F. M. de S. Genomic insights into organic acid production and plant growth promotion by different species of phosphate-solubilizing bacteria. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 40, e311, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-04119-3>
- ALORI, E. T.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. **Frontiers in microbiology**, v. 8, e971, 2017. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- ANJANADEVI, I. P.; JOHN, N. S.; JOHN, K.S.; JEEVA, M. L.; MISRA, R. S. Rock inhabiting potassium solubilizing bacteria from Kerala, India: characterization and possibility in chemical K fertilizer substitution. **Journal of Basic Microbiology**, v. 56, n. 1, p. 67-77, 2016. <https://doi.org/10.1002/jobm.201500139>
- ASRIL, M.; LISAFITRI, Y.; NISWATI, A.; DIRMAWATI, S. R.; WIBOWO, R. H.; SIPRIYADI, S. The potential of phosphate solubilizing and plant growth promoters of *Burkholderia territorii* ef. nap 1 isolated from acid soils for the conservation of formerly rubber plantation land. **International Journal of Conservation Science**, v. 14, n. 1, p. 317-330, 2023. <https://10.36868/IJCS.2023.01.22>
- ASSUNÇÃO, R. D. da; CASSOL, P. C.; GRANADOS, S. B.; MAFRA, Á. L.; M BITTENCOURT, R. F. de. Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 2, e275193, 2024. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275193>
- AZNAR, A.; DELLAGI, A. New insights into the role of siderophores as triggers of plant immunity: what can we learn from animals? **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 11, p. 3001-3010, 2015. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv155>
- BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Eds.). **Handbook of plant nutrition**. 2 Ed. Boca Raton, FL: CRC press, 2015. 773p.
- BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050** (PNF 2050). Brasília: SAE, 2021. 195p.
- CARVALHO JUNIOR, W. de; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B.; PEREIRA, N. R.; CHAGAS, C. da S.; MACEDO, J. R. Os solos tropicais e sua distribuição: uma visão segundo dados de livre acesso. **Brazilian Journal of Development**, v.8, n.8, p. 54835-54848, 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n8-009>
- CAVALCANTE, F. G.; BANDEIRA, L. L.; LEITE, L. O.; DA SILVA, A. O.; MESQUITA, A. D. F. N.; DE MATOS NETO, J. M.; MARTINS, C. M.; MARTINS, S. C. S. Grupos Funcionais do solo: papel das comunidades microbianas especializadas na ciclagem de nutrientes e sensores de distúrbios ambientais. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 15, n. 9, p. 8676-8698, 2023. <https://doi.org/10.55905/cuadv15n9-038>
- CHANG, W.; YANG, C.; LIU, T.; TIAN, P.; ZHANG, S.; DAI, X.; IGARASHI, Y.; LUO, F. Revealing the phosphate-solubilizing characteristics and mechanisms of the plant growth-promoting bacterium *Agrobacterium deltaense* C1. **Journal of Applied Microbiology**, v. 135, n. 1, p. lxad284, 2024. <https://doi.org/10.1093/jambio/lxad284>
- CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F. D.; SILVA, V. R. D.; BASSO, C. J. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 39, p. 615-625, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140462>
- CUI, K.; XU, T.; CHEN, J.; YANG, H.; LIU, X.; ZHUO, R.; PENG, Y.; TANG, W.; WANG, R.; CHEN, L.; ZHANG, X.; ZHANG, Z.; HE, Z.; WANG, X.; LIU, C.; CHEN, Y.; ZHU, Y. Siderophores, a potential phosphate solubilizer from the endophyte *Streptomyces* sp. CoT10, improved phosphorus mobilization for host plant growth and rhizosphere modulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 367, e133110, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133110>
- CUI, N. X.; CAI, M.; ZHANG, X.; ABDELHAFEZ, A. A.; ZHOU, L.; SUN, H. F.; CHEN, G. F.; ZOU, G. Y.; ZHOU, S. Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications. **Global Ecology and Conservation**, v. 22, e1011, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01011>
- DEY, G.; BANERJEE, P.; SHARMA, R. K.; MAITY, J. P.; ETESAMI, H.; SHAW, A. K.; CHEN, C. Y.

Management of phosphorus in salinity-stressed agriculture for sustainable crop production by salt-tolerant phosphate-solubilizing bacteria - A review. **Agronomy**, v. 11, n. 8, e1552, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081552>

- DOS REIS, G. A.; MARTÍNEZ-BURGOS, W. J.; POZZAN, R.; PUCHE, Y. P.; OCÁN-TORRES, D.; MOTA, P. de Q. F.; RODRIGUES, C.; SERRA, J. L.; SCAPINI, T.; KARP, S. G.; SOCCOL, C. R. Comprehensive Review of microbial inoculants: agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks. **Sustainability**, v. 16, n. 19, e8720, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16198720>
- ETESAMI, H.; EMAMI, S.; ALIKHANI, H. A. Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 4, p. 897-911, 2017. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000400005>
- ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 156, p. 225-246, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013>
- FAGERIA, N. K. Potassium. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Eds.). **Handbook of plant nutrition**. 2 Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. p. 127-163.
- FAHDE, S.; BOUGHRIBIL, S.; SIJILMASSI, B.; AMRI, A. Rhizobia: a promising source of plant growth-promoting molecules and their non-legume interactions: examining applications and mechanisms. **Agriculture**, v. 13, n. 7, e1279, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071279>
- FITRIATIN, B. N.; FAUZIAH, D. A.; HINDERSAH, R.; SIMARMATA, T. The influence of different acidic conditions on the plant growth-promoting rhizobacteria activity of phosphate solubilizing bacteria. **KnE Life Sciences**, v. 7, n. 3, p. 72-78, 2022. <https://doi.org/10.18502/kl.v7i3.11108>
- FREIRE, F. J.; SANTOS, R. L. dos; LIMA, D. R. M. de; ALMEIDA, I. V. de. Fertilidade em solos tropicais. In: FERNANDES, J. G.; CARVALHO, E. X. de. **Solos: Estudos, potencialidades e uso**. Recife, PE: Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA, 2021. 217p.
- GAO, Z.; LI, P.; LI, C.; TANG, R.; WANG, M.; CHEN, J.; YANG, Y.; HE, Z.; XIAO, Z.; MA, Y.; CHEN, Y. Identification, functional annotation, and isolation of phosphorus-solubilizing bacteria in the rhizosphere soil of *Svida wilsoniana* (Wanger) Sojak. **Applied Soil Ecology**, v. 194, e105207, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105207>
- GOMES, E. A.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; LANA, U. D. P.; SILVA, U. D. C.; MARRIEL, I. E. **Potencial de microrganismos para solubilização de fosfatos de rocha**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 29p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento)
- GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; KLEIN, D. K. Promoção de crescimento e solubilização de fosfato na cultura da soja: coinoculação de sementes com *Bradyrhizobium japonicum* e *Pseudomonas fluorescens*. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, e366101120078, 2021. <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n46-012>
- GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; KLEIN, D. K. Promoção de crescimento e solubilização de fósforo, por *Bacillus megaterium* e *B. subtilis*, via inoculação de sementes, associado à fertilização fosfatada, na cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, p. e9812240062, 2023. <https://doi.org/10.55905/oe1v21n9-055>
- HANYABUI, E.; APORI, S. O.; FRIMPONG, K. A.; ATIAH, K.; ABINDAW, T.; BYALEBEKA, J.; ALI, M.; ASIAMA, J. Y. Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, e599, 2020. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2020.4.599>
- HAWKESFORD, M. J.; CAKMAK, I.; COSKUN, D.; DE KOK, L. J.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J. K.; WHITE, P. J. Functions of macronutrients. In: **Marschner's Mineral Nutrition of Plants**. Academic Press, p. 201-281, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>
- IQBAL, Z.; AHMAD, M.; RAZA, M. A.; HILGER, T.; RASCHE F. Phosphate-Solubilizing *Bacillus* sp. modulate soil exoenzyme activities and improve wheat growth. **Microbial Ecology**, v. 87, e31, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02340-5>
- KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, e4917256, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
- KOCZORSKI, P.; FURTADO, B. U.; BAUM, C.; WEIH, M.; INGVARSSON, P.; HULISZ, P.; HRYNKIEWICZ, K. Large effect of phosphate-solubilizing bacteria on the growth and gene expression of *Salix* spp. at low phosphorus levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, e1218617, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1218617>
- KOUR, D.; RANAA, K. L.; KAURA, T.; YADAV, N.; HALDERC, S. K.; YADAVA, A. N.; SACHAND, S. G.; SAXENA, A. K. Potassium solubilizing and mobilizing microbes: biodiversity, mechanisms of solubilization, and biotechnological implication for alleviations of abiotic stress. In: RASTEGARI, A. A.; YADAV, A. N.; YADAV, N. (Eds.). **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 177-202. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-820526-6.00012-9>
- LEITE, A. A.; CARDOSO, A. A. S.; LEITE, R. A.; OLIVEIRA-LONGATTI, S. M.; LUSTOSA FILHO, J. F.; MOREIRA, F. M. S.; MELO, L. C. A. Selected bacterial strains enhance phosphorus availability from biochar-based rock phosphate fertilizer. **Annals of Microbiology**, v. 70, n. 1, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01550-3>
- MADRID-DELGADO, G.; OROZCO-MIRANDA, M.; CRUZ-OSORIO, M.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, O. A.; RODRIGUEZ-HEREDIA, R.; ROA-HUERTA, M.; AVILA-QUEZADA, G. D. Pathways of phosphorus absorption and early signaling between the mycorrhizal fungi and plants. **Phyton**, v. 90, n. 5, p. 1321-1338, 2021. <https://doi.org/10.32604/phyton.2021.016174>
- MAHARANA, R.; DHAL, N. K. Solubilization of rock phosphate by phosphate solubilizing bacteria isolated from effluent treatment plant sludge of a fertilizer plant. **Folia Microbiol**, v. 67, p. 605-615, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12223-022-00953-w>
- MAHMOOD, S.; DAUR, I.; AL-SOLAIMANI, S. G.; AHMAD, S.; MADKOUR, M. H.; YASIR, M.; HIRT, H.; ALI, H.; ALI, Z. Plant growth promoting

- rhizobacteria and silicon synergistically enhance salinity tolerance of mung bean. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 876-890, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00876>
- MASSENSINI, A. M.; TÓTOLA, M. R.; BORGES, A. C.; COSTA, M. D. Solubilização potencial de fosfatos mediada pela microbiota rizosférica de eucalipto cultivado em topossequência típica da Zona da Mata Mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 692-700, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140339>
- MAZZUCO, V. R.; TORRES JÚNIOR, C. D. C.; BOTELHO, G. R. *Pseudomonas* spp. fluorescente e *Bacillus* spp. para solubilização de fosfato e promoção de crescimento em alho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 53, e75301, 2023. <https://doi.org/10.1590/1983-40632023v5375301>
- MELLO, S. DA C.; MENDONÇA, J. A. **Olericultura: Nutrição de olerícolas**. Curitiba: SENAR-PR. 2017. 80p.
- MELLO, R. F. de; VOLTOLINI, T. V. (Eds.). Uso e manejo do solo. In: MELLO, R. F. de; GIONGO, V.; DEON, D. S.; ANJOS, J. B. dos. **Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 395-442.
- MEYER, M. C.; BUENO, A. de F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (Eds.). **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. 550p.
- MINUȚ, M.; DIACONU, M.; ROȘCA, M.; COZMA, P.; BULGARIU, L.; GAVRILESCU, M. Screening of *Azotobacter*, *Bacillus* and *Pseudomonas* species as plant growth-promoting bacteria. **Processes**, v. 11, n. 1, e80, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr11010080>
- MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G.; PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS medicine**, v. 6, n. 7, e1000097, 2009. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- MOSTOFA, M. G.; RAHMAN, M. M.; GHOSH, T. K.; KABIR, A. H.; ABDELRAHMAN, M.; KHAN, M. A. R.; MOCHIBA, K.; TRAN, L. S. P. Potassium in plant physiological adaptation to abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 186, p. 279-289, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.07.011>
- NASEEM, H.; AHSAN, M.; SHAHID, M. A.; KHAN, N. Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. **Journal of Basic Microbiology**, v. 58, n. 12, p. 1009-1022, 2018. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800309>
- NATH, S.; DEY, S.; KUNDU, R.; PAULO, S. Phosphate and zinc interaction in soil and plants: a reciprocal cross-talk. **Plant Growth Regulation**, v. 104, p. 591-615, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01201-6>
- NATH, D.; MAURYA, B. R.; MEENA, V. S. Documentation of five potassium-and phosphorus-solubilizing bacteria for their K and P-solubilization ability from various minerals. **Biocatalysis and agricultural biotechnology**, v. 10, p. 174-181, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cbab.2017.03.007>
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C. dos; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JUNIOR, R. **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 18p. (Circular Técnica, 260)
- OLIVEIRA, C. A.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; SANTOS, F. C. dos; PINTO JÚNIOR, A. S.; ALVES, V. M. C. **Viabilidade técnica e econômica do Biomaphos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas culturas de milho e soja**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 20p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 210)
- PATIL, N.; RAGHU, S.; MOHANTY, L.; JEEVAN, B.; BASANA-GOWDA, G.; ADAK, T.; ANNAMALAI, M.; RATH, P. C.; SENGOTTAYAN, S. N.; GOVINDHARAJ, G. P. P. Rhizosphere bacteria isolated from medicinal plants improve rice growth and induce systemic resistance in host against pathogenic fungus. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 43, p. 770-786, 2023. <http://dx.doi.org/10.1007/s00344-023-11137-2>
- PAULILO, M. T. S.; VIANA, A. M.; RANDI, A. M. Nutrição Mineral. In: **Fisiologia Vegetal**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. p. 42-43.
- PEREIRA, D. S.; COSTA, Y. K. S. da; CARVALHO, L. B. de. O elemento P: Formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 5, p. 1-4, 2021. <https://doi.org/10.29372/rab202124>
- PEREIRA, N. C. M.; GALINDO, F. S.; GAZOLA, R. P. D.; DUPAS, E.; ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E.; S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Corn yield and phosphorus use efficiency response to phosphorus rates associated with plant growth promoting bacteria. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, e40, 2020. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00040>
- RAMAKRISHNA, W.; YADAV, R.; LI, K. Plant growth promoting bacteria in agriculture: two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 10-18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.019>
- RATHOD, K.; RANA, S.; DHANDHUKIA, P.; THAKKER, J. N. From Sea to Soil: Marine *Bacillus subtilis* enhancing chickpea production through in vitro and in vivo plant growth promoting traits. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 55, p. 823-836, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01238-1>
- RAWAT, P.; DAS, S.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S. C. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 49-68, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- REHMAN, H. F.; ASHRAF, A.; MUZAMMIL, S.; SIDDIQUE, M. H.; ALI, T. Avaliação do potencial de solubilização do zinco da cepa ZSB13 de *Pseudomonas oleovorans* resistente ao zinco isolada de solo contaminado. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e240015, 2021. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.240015>
- RODRIGUES, G. L.; MATTEOLI, F. P.; GAZARA, R. K.; RODRIGUES, P. S.; DOS SANTOS, S. T.; ALVES, A. F.; SILVA, F. P.; PINHEIRO, I. O.; ALVARENGA, D. C.; OLIVARES, F. L.; VENANCIO, T. M. Characterization of cellular, biochemical and genomic features of the diazotrophic plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* sp. UENF-412522, a novel member of the *Azospirillum* genus. **Microbiological**

Research, v. 254, e126896, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126896>

SARMIENTO, L. H.; SILVA, F. B. da; SANTOS, B. T. dos; BENEDUZI, A.; SÁ, E. L. S. de. Selection of multi-purpose native rhizobia from a new red clover cultivar developed in Brazil. **Rhizosphere**, v. 29, e100847, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100847>

SATTAR, A.; NAVEEDA, M.; ALIA, M.; ZAHIRA, Z.; NADEEMB, S.; YASEENA, M.; MEENAC, V. S.; FAROOQD, M.; SINGHE, R.; RAHMANF, M.; MEENA, H. N. Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: a review. **Applied Soil Ecology**, v. 133, p. 146- 159, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.09.012>

TIMOFEEVA, A.; GALYAMOVA, M.; SEDYKH, S. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. **Plants**, v. 11, n. 16, e2119, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11162119>

VELLOSO, C. C. V.; OLIVEIRA, C. A. de; GOMES, E. A.; LANA, U. G. D. P.; CARVALHO, C. G. de; GUIMARÃES, L. J. M.; CARVALHO, C. G. de; GUIMARÃES, L. J. M.; PASTINA, M. M.; SOUSA, S. M. de. Genome-guided insights of tropical *Bacillus* strains efficient in maize growth promotion. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 96, n. 9, f157, 2020. <https://doi.org/10.1093/femsec/f157>

VERMA, S. K.; WHITE, J. F. Indigenous endophytic seed bacteria promote seedling development and defend against fungal disease in browntop millet (*Urochloa ramosa* L.). **Journal of Applied Microbiology**, v. 124, n. 3, p. 764-778, 2018. <https://doi.org/10.1111/jam.13673>

WYCISZKIEWICZ, M.; SAEID, A.; MALINOWSKI, P.; CHOJNACKA, K. Valorization of phosphorus secondary raw materials by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Molecules**, v. 22, n. 3, e473, 2017. <https://doi.org/10.3390/molecules22030473>

WEI, Y.; ZHAO, Y.; SHI, M.; CAO, Z.; LU, Q.; YANG, T.; FAN, W.; WEI, Z. Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation. **Bioresource Technology**, v. 247, 190-199, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.092>

XU, H. Y.; LV, J.; YU, C. Growth Promoting of *Pinus massoniana* seedlings regulated by rhizosphere phosphate-solubilizing *Paraburkholderia* spp. **Biotechnology Bulletin**, v. 39, n. 6, e274, 2023. <https://doi.org/10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2022-1226>

ZHANG, C.; KAI, C.; LI, M. Y.; ZHENG, J.; HAN, Y. Plant-growth-promoting potential of PGPE isolated from *Dactylis glomerata* L. **Microorganisms**, v. 10, n. 4, e731, 2022. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040731>

ZONTA, E.; STAFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. In: BORGES, A. L (Ed.). **Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. Brasília: Embrapa, 2021. p. 263-303.

Agradecimentos: À Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas: FAPEAM; Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico: CNPq (INCT-CNPq 465133/2014-4 e 405666/2022-5) e à Embrapa Amazônia Ocidental.

Contribuição dos autores: Todos os autores contribuíram igualmente para a concepção e redação do manuscrito. Todos os autores revisaram criticamente o manuscrito e aprovaram a versão final.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.



Copyright: © 2024 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).