

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
TRIÂNGULO MINEIRO – CAMPUS UBERABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL  
MESTRADO PROFISSIONAL EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**HUGO ELÓI COUTINHO DE OLIVEIRA**

**MODO DE APLICAÇÃO E DOSES DE SOLUBILIZADOR DE FÓSFORO EM  
MILHO SAFRINHA**

**UBERABA – MG**

**2023**

**HUGO ELÓI COUTINHO DE OLIVEIRA**

**MODO DE APLICAÇÃO E DOSES DE SOLUBILIZADOR DE FÓSFORO EM  
MILHO SAFRINHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação de Mestrado Profissional em Produção Vegetal, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro – Campus Uberaba, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Produção Vegetal.

**Orientador:** Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres

**UBERABA – MG**

**2023**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Setor de Referência do IFTM –  
Campus Uberaba-MG

O4m

Oliveira, Hugo Elói Coutinho de  
Modo de aplicação e doses de solubilizador de fósforo em milho safrinha/ Hugo  
Elói Coutinho de Oliveira – 2023.  
50 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres.  
Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal) - Instituto Federal  
do Triângulo Mineiro - Campus Uberaba-MG, 2023.

1. Bioinoculante. 2. Zea Mays L. 3. Fosfato inorgânico. 4. Bioinsumos.  
I. Torres, José Luiz Rodrigues. II. Título.

CDD 630

*HUGO ELÓI COUTINHO DE OLIVEIRA*

**"MODOS DE APLICAÇÃO E DOSES DE SOLUBILIZADOR DE FÓSFORO EM MILHO SAFRINHA"**

**FOLHA DE APROVAÇÃO DEFESA DISSERTAÇÃO**

Data da aprovação: 28/08/2023

**MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:**

**Presidente e orientador:**

**Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do  
Triângulo Mineiro - Campus Uberaba

**Membro Titular**

**Prof. Dr. Valdeci Orioli Júnior**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do  
Triângulo Mineiro - Campus Uberaba

**Membro Titular**

**Profª Drª Rose Luiza Moraes Tavares**

Universidade de Rio Verde-GO

**Local:** Sala de Videoconferência - [meet.google.com/hsi-snpk-ngc](https://meet.google.com/hsi-snpk-ngc)

ROSE LUIZA MORAES TAVARES  
URV-GO - MEMBRO TITULAR EXTERNO DE BANCA DE DEFESA/QUALIFICAÇÃO DE  
ESPECIALIZAÇÃO/MESTRADO/DOCTORADO

Documento assinado eletronicamente por ROSE LUIZA MORAES TAVARES, URV-GO - MEMBRO TITULAR EXTERNO DE BANCA DE DEFESA/QUALIFICAÇÃO DE ESPECIALIZAÇÃO/MESTRADO/DOCTORADO, em 30/08/2023, às 08:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

JOSÉ LUIZ RODRIGUES TORRES  
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO

Documento assinado eletronicamente por JOSÉ LUIZ RODRIGUES TORRES, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 30/08/2023, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

VALDECI ORIOLI JÚNIOR  
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO

Documento assinado eletronicamente por VALDECI ORIOLI JÚNIOR, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 31/08/2023, às 13:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://www.iftm.edu.br/autenticacao/> informando o código verificador **1721910** e o código CRC **EA5C4940**.

Dedico esta dissertação aos meus pais, cujo amor, apoio inabalável e sacrifícios tornaram possível esta conquista. Minha gratidão também se estende aos amigos que compartilharam risadas, desafios e momentos memoráveis durante esta jornada. Cada aprendizado e obstáculo superado foram moldados pela presença inspiradora de vocês. Que este trabalho possa contribuir de alguma forma para o avanço do conhecimento na área.

## **AGRADECIMENTOS**

Com imensa gratidão, expresso meus agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro Campus Uberaba, por gentilmente disponibilizar sua infraestrutura, equipamentos e laboratórios essenciais para a realização deste curso, culminando na obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Quero estender minha sincera apreciação ao professor Titular, Dr. José Luiz Rodrigues Torres, cuja dedicação, orientação e participação ativa em todas as etapas deste trabalho foram fundamentais para a sua concretização.

Aos amigos e colegas do mestrado, compartilho meus agradecimentos pelos momentos inesquecíveis que vivenciamos juntos, mesmo diante das dificuldades enfrentadas ao longo do percurso.

Não posso deixar de reconhecer e valorizar todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do IFTM, cujo compartilhamento de conhecimentos e experiências contribuiu significativamente para a minha formação acadêmica.

Uma menção especial de agradecimento à empresa Corteva, por autorizar minha participação no programa de Pós-graduação e oferecer apoio constante durante o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro através do auxílio concedido ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu – Mestrado Profissional em Produção Vegetal, assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas bolsas concedidas ao orientador e aos estudantes, além do financiamento de parte do projeto.

Minha sincera gratidão também se estende à banca examinadora, Prof. Dr. Valdeci Orioli Júnior e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rose Luiza Moraes Tavares, cujas valiosas contribuições enriqueceram e aprimoraram esta dissertação.

Por fim, quero expressar meu profundo agradecimento a todos aqueles que, de diversas formas, contribuíram para a realização desta conquista significativa em minha trajetória acadêmica.

Ofereço, esta dissertação a todos os que buscam conhecimento e compreensão. Reconhecendo a busca incessante por respostas e entendimento mais profundo, este oferecimento é uma homenagem a todos os interessados na expansão do saber. É também um tributo aos contribuintes anteriores nesse caminho. Que este trabalho possa servir como um recurso inspirador para aqueles que desejam explorar e compreender melhor o mundo ao nosso redor.



## RESUMO

A utilização de bactérias solubilizadoras de fosfato é uma tecnologia que pode aumentar a biodisponibilidade do fósforo (P) no solo e melhorar a produtividade das culturas, pois o P é um elemento essencial para as culturas agrícolas. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de bactérias solubilizadoras de P, para aumentar a disponibilidade do nutriente no solo e favorecer o cultivo do milho safrinha na região de Patos de Minas – MG. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, onde foram avaliados sete tratamentos com aplicação de adubação fosfatada de base (AFB), no sulco de plantio (AFBSP) e do solubilizador de P (SP): T1 = Sem AFBSP e sem SP (Testemunha); T2 = Com AFBSP e sem SP; T3 = AFBSP + 0,75 ml do SP em área total; T4 = AFBSP + 150 ml do SP em área total; T5 = AFBSP + 225 ml do SP em área total; T6 = AFBSP + 300 ml do SP em área total; T7 = AFBSP + 150 ml do SP no sulco de plantio, todos com quatro repetições. Avaliou-se o estado nutricional da planta por ocasião do aparecimento da inflorescência feminina, os teores de P no solo nas profundidades de 0 - 10, 10 - 20 e 20 - 30 cm após a colheita do milho e a produtividade da cultura. A aplicação do solubilizador em área total ou no sulco proporcionou maior disponibilidade de P na planta, quando comparado à testemunha sem a aplicação do produto. Houve aumento significativo da disponibilidade de P no solo com o aumento das doses do solubilizador no solo em área total. A produtividade foi significativamente superior nos tratamentos onde aplicou-se de 150 a 300 ml de solubilizador em área total ou no sulco de plantio, quando comparado aos outros tratamentos.

**Palavras chave:** bioinoculante, Zea Mays L.; fosfato inorgânico; bioinsumos

## ABSTRACT

The use of phosphate-solubilizing bacteria is a technology that can increase the phosphorus (P) bioavailability in the soil and enhance crop productivity, as P is an essential element for agricultural crops. The objective of this study was to evaluate the use of P-solubilizing bacteria to increase nutrient availability in the soil and promote safrinha corn cultivation in the Patos de Minas region, MG. The experimental design employed was a randomized block design, where seven treatments with the application of basic phosphate fertilization (BPF) in the planting furrow (BPFF) and phosphate solubilizer (PS) were evaluated: T1 = Without BPFF and PS (Control); T2 = With BPFF and without PS; T3 = BPFF + 0.75 ml of PS over the entire area; T4 = BPFF + 150 ml of PS over the entire area; T5 = BPFF + 225 ml of PS over the entire area; T6 = BPFF + 300 ml of PS over the entire area; T7 = BPFF + 150 ml of PS in the planting furrow, all with four replicates. The nutritional status of the plant was assessed when the female inflorescence appeared, as well as soil P levels at depths of 0-10, 10-20, and 20-30 cm after corn harvest, and crop productivity. The application of the solubilizer over the entire area or in the furrow provided higher P availability in the plant compared to the control without the product application. There was a significant increase in soil P availability with increasing doses of the solubilizer in the entire area. Productivity was significantly higher in treatments where 150 to 300 ml of solubilizer were applied over the entire area or in the planting furrow, compared to the other treatments.

**Keywords:** bioinoculant, *Zea Mays* L.; inorganic phosphate; bioinputs

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Compartimentos de P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) no solo.....	18
Figura 2. Precipitação pluviométrica e temperaturas médias mensais do ar no período entre fevereiro e agosto/2022, obtido junto ao Instituto Nacional de Meteorologia, durante a condução da pesquisa do Experimento. ....	29
Figura 3. Aplicação dos tratamentos sendo realizada por com uma barra de três metros de largura e seis bicos tipo leque, acoplado a um cilindro de CO <sub>2</sub> .....	30
Figura 4. Coleta de folhas do terço basal da folha oposta e abaixo da primeira espiga (superior), excluindo a nervura central, para análise do estado nutricional da planta. ....	32
Figura 5. Coleta de amostras de solo utilizando a furadeira STIHL tipo “Saci” nas profundidades de 0 a 0,30 m, para análise química de macronutrientes. ....	33
Figura 6. Quantificação da produção nas linhas centrais de cada parcela experimental e determinação da umidade, para corrigir valores para 13% de umidade. ....	33
Figura 7. Curvas de regressão dos teores de N, P e Ca obtidos na análise foliar do milho, após aplicação de diferentes doses de solubilizadores de P, em Patos de Minas, MG. ....	37
Figura 8. Análise de regressão da produtividade, mostrando que houve ajuste linear da produtividade com o aumento das doses aplicadas de solubilizador de P, em Patos de Minas, MG. ....	40
Figura 9. Análise de regressão e equações do P remanescente (P rem) no solo, nas profundidades de 0 a 30 cm, após aplicação das doses de solubilizadores de P. ....	42

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Estado nutricional do milho safrinha observada através da análise foliar, após a aplicação de diferentes doses de solubilizadores de P, em Patos de Minas, MG.....	35
Tabela 2. Doses de solubilizadores de P e produtividade do milho safrinha no momento da colheita, em Uberaba, MG.....	39
Tabela 3. Doses de solubilizadores de P e relações com os atributos químicos do solo em áreas com milho safrinha, nas profundidades de 0 a 30 cm, em Patos de Minas, MG.....	41

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IFTM Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro

AFBSP Adubação Fosfatada de Base no Sulco do Plantio

MAPA Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento

PHT Transportador de Fosfato

APT Adenosina Trifosfato USDA Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

AT Área Total

Cr318 Burkholderia Cenocepacia

CNPMS Bacillus Subtilis

CNPMS B119 Estirpe de B. Megaterium

CNPMS B2084 Estirpe de B. Subtilis

AIA Avaliação de Impacto Ambiental

CTC Capacidade troca catiônica

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>14</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	14
1.2 REVISÃO DE LITERATURA .....	17
1.2.1 A CULTURA DO MILHO: PANORAMA MUNDIAL E NACIONAL .....	17
1.2.2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA .....	18
1.2.3 MÉTODOS DE APLICAÇÃO .....	21
1.2.4 BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FÓSFORO .....	22
1.2.5 BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA .....	24
1.2.6 BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS .....	25
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>29</b>
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	29
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	29
2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	30
2.3 AVALIAÇÕES REALIZADAS .....	31
2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	34
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>35</b>
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
4 CONCLUSÃO .....	43
<b>5 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>44</b>

# CAPÍTULO I

## 1.1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais cultivadas no mundo, ficando atrás apenas do trigo e do arroz, que tem o Brasil como segundo maior produtor mundial (Conab, 2019). As projeções oficiais indicam que a produção brasileira de milho vai continuar aumentando, saindo dos atuais 102,3 milhões de toneladas obtidos na safra 2019/20 para um patamar de 123,9 a 150,8 milhões de toneladas na safra 2029/30 (Mapa, 2022).

Este aumento de produção está diretamente relacionado ao manejo e a adubação realizada na cultura, visto que o milho é uma planta mais exigente em alguns macronutrientes, que extrai os mesmos do solo na sequência: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, crescendo linearmente com o aumento da produtividade (Malavolta, 2006).

O crescimento das plantas e a sua produção dependem em grande parte do teor de P no solo, pois é o segundo macronutriente em demanda para o desenvolvimento e produtividade das plantas (Ketterings e Czymmek, 2020). Este P está envolvido em diversas reações fisiológicas e bioquímicas, incluindo fotossíntese, desenvolvimento de raízes e caules, formação de flores e sementes, maturação de culturas, fixação de nitrogênio em leguminosas e resistência a doenças de plantas (Azziz *et al.*, 2012).

Entretanto, os solos predominantes nos trópicos e subtropicais são pobres em fertilidade, ácidos e apresentam sérios problemas de adsorção de P, pois ocorre o processo químico de passagem do P lábil para o não lábil (Camargo *et al.*, 2010), em que parte considerável do P inorgânico adicionado aos solos é retida com energia tal que seu equilíbrio com o P na solução desaparece deixando de ser útil ao crescimento imediato da planta (Novais *et al.*, 2007). Essa forma de P (não-lábil), segundo Novais e Smyth (1999), deve ser quantificada, compreendida e controlada adequadamente para otimização das adubações fosfatadas especialmente em solos intemperizados.

Outro fator importante a ser destacado é baixa disponibilidade natural de P nestes solos leva à aplicação desses macronutrientes em principalmente via fertilizantes inorgânicos solúveis (Casali *et al.*, 2016). Todavia, altas quantidades de adubação fosfatada, são de certa forma necessárias ao sistema ocorrendo nos solos intemperizados como alternativa para contornar o problema da forte adsorção do nutriente (Lemos, 2015). Nesse cenário de limitações naturais do ambiente de cultivo, ganham espaço as alternativas que promovam, em conjunto, a

disponibilização do nutriente e a redução na dependência de ~~pesadas~~ altas doses de P na adubação (Neufeldt *et al.*, 2000).

Os modos de aplicação mais comuns para adubos fosfatados incluem a aplicação a lanço na superfície com incorporação, a aplicação a lanço na superfície sem incorporação e a aplicação no sulco de plantio, conforme relatado por Souza *et al.* (2004). De acordo com Malavolta (1981), a adubação a lanço com incorporação é associada a um aumento na área de contato entre o fertilizante fosfatado e o solo, possibilitando uma maior adsorção de fósforo (P), embora possa reduzir a eficiência de absorção do P pelas plantas.

Por outro lado, adubos fosfatados com alta solubilidade são recomendados para aplicação no sulco de plantio (Motomiya; Fabrício; Marchetti, 2004), o que resulta em um aumento da concentração de P na área de adubação, beneficiando as plantas, embora isso possa comprometer o desenvolvimento do sistema radicular (Resende e Furtini Neto, 2007). Contudo, sabe-se que a eficiência da aplicação de fertilizantes fosfatados no solo varia de 10% a 25%, o que resulta em níveis reduzidos de fósforo acessível a microrganismos e plantas (Richardson e Simpson, 2011).

Com relação à aplicação de fontes de fósforo (P) ainda há divergências de opinião, pois os defensores da aplicação a lanço, argumentam em prol de sua eficácia, enquanto outros enfatizam a importância da aplicação localizada deste nutriente no sulco de plantio, recomendação fundamentada na limitada mobilidade do fósforo no solo e no risco potencial de escoamento superficial em direção a corpos d'água (Prochnow *et al.*, 2017).

A alta demanda de P no sistema solo/planta, associada aos aumentos recentes e futuros, previstos nos custos de fertilizantes fosfatados, atrelado ao declínio das reservas de minerais de P, levantaram sérias preocupações sobre o uso eficiente deste recurso não renovável (Pavinato *et al.*, 2020). Tendo em vista que é necessário ampliar a biodisponibilidade de fosfato insolúvel no solo para as plantas, este tem sido um dos principais objetivos do desenvolvimento agrícola mundial.

As bactérias presentes no solo, na rizosfera e no interior das plantas desempenham um papel fundamental na absorção de nutrientes pelas plantas e participam de uma ampla gama de processos biológicos, sendo que algumas destas bactérias podem solubilizar o P insolúvel no solo, tornando-o disponível para as plantas absorverem.

Além da fertilização química, a dissolução e mineralização do fosfato microbiano, aquele disponível para a planta através da ação de microrganismos, é um meio possível de aumentar a quantidade de P disponível para as plantas. Muitos microrganismos no solo e na



rizosfera são conhecidos por liberar eficientemente o P do solo através da dissolução e mineralização (Bhattacharyya e Jha, 2012)., e esses microrganismos são chamados de microrganismos solubilizadores de fosfato.

Alguns microrganismos com potencial em solubilizar fosfato têm sido prospectados e estudados principalmente por sua segurança ambiental, baixo custo e alta eficiência (Owen *et al.*, 2015). Além disso, podem promover o crescimento das plantas, aumentando a eficiência da fixação biológica de nitrogênio e síntese de fitohormônios, secretando ácido indol-acético, bem como aumentando a disponibilidade de certos micronutrientes, como zinco e ferro, além de produzir sideróforos (Zhang *et al.*, 2018). Microrganismos solubilizadores quando utilizados como biofertilizantes aumentam o rendimento das plantas e a absorção de P (Huu *et al.*, 2022)

Facilitar a absorção e utilização de fosfato pelas culturas agrícolas é crucial por razões econômicas e ambientais, desta forma, a dissolução de fosfato por microrganismos do solo é considerada um objeto de pesquisa particularmente promissor, além de compreender a melhor forma de aplicação. Diante deste contexto, neste estudo objetivou-se avaliar o uso de solubilizadores de P para aumentar a disponibilidade do nutriente no solo e favorecer o cultivo do milho safrinha na região de Patos de Minas – MG.

## 1.2 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.2.1 A CULTURA DO MILHO: PANORAMA MUNDIAL E NACIONAL

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal mais cultivado no Brasil e no mundo, pois pode ser cultivado em diversas condições ambientais nos trópicos e subtropicais, sendo amplamente utilizado na dieta humana, na ração animal e como matéria-prima para uma grande variedade de produtos industriais (Ayyar *et al.*, 2019).

A produção mundial de milho é da ordem de 1,1 bilhão de toneladas, sendo os Estados Unidos o maior produtor, com 384 milhões de toneladas, seguido pela China, com 273 milhões de toneladas, e pelo Brasil, com 116 milhões de toneladas (Usda, 2022). Esta elevada produção transformou o cultivo do milho em uma das culturas com maior importância em diversas cadeias produtivas, com foco vinculado à produção de carne, tem incentivado a produção do cereal em diversos territórios por todo planeta nas últimas décadas (Moreira, 2011; Miranda *et al.*, 2021).

No Brasil, a produção de milho no país é dividida em duas safras, sendo a segunda safra realizada após o plantio da soja ou algodão (Conab, 2020). As projeções oficiais indicam que a produção brasileira de milho vai aumentar de 102,3 milhões de toneladas na safra 2019/20 para 123,9 a 150,8 milhões de toneladas na safra 2029/30, representando um incremento de 21,2%. Esse aumento na produção será impulsionado pelo aumento das exportações e pelo crescimento do consumo no mercado interno, estimulado pelo setor da pecuária e produção de etanol, contudo, esta evolução dependerá do aumento da produtividade por área, o que exigirá maior investimento em formas de manejo (Mapa, 2022).

Em Minas Gerais, a área plantada pode ter uma expansão de 11,5%, e deve alcançar 3,9 milhões de hectares, que se comparado com levantamento anterior divulgado (fevereiro/2021), houve um aumento de 852,9 mil toneladas na produção mineira de grãos (Conab, 2021).

Dentre os fatores tecnológicos que aumentam a produtividade e consequente competitividade da produção de milho no Brasil, a fertilidade do solo, a nutrição e a adubação química são indicadores claros da sustentabilidade da atividade e do lucro final. O fornecimento suficiente e eficiente de nutrientes para atender as demandas ao longo do ciclo da cultura de forma equilibrada e suficiente é uma abordagem alternativa para maximizar essas demandas (Coelho, 2019).

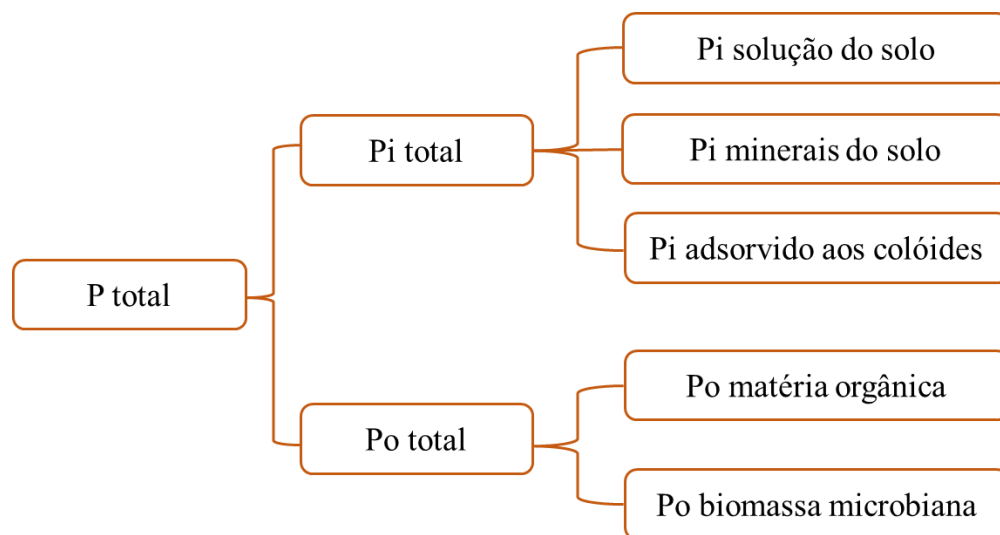
As plantas de desenvolvimento acelerado e de ciclo anual, como o milho, demandam um maior teor de P em solução e reposição mais rápida do P-adsorvido que as plantas de

culturas perenes. Assim, a utilização de doses corretas de adubação e novas formas de facilitar a absorção do nutriente pela planta é de fundamental importância para conseguir o máximo potencial produtivo da cultura (Bastos *et al.*, 2010).

### 1.2.2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O P é um macronutriente intimamente relacionado com crescimento e produtividade das plantas, e a sua deficiência é um dos fatores mais limitantes para a produção agrícola em muitos solos em todo o mundo (He *et al.*, 2017). Em termos mais genéricos, P pode ser dividido em duas categorias principais para facilitar a compreensão, P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po), separados por compostos que faz ligação com o P (Figura 1).

Figura 1. Compartimentos de P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) no solo.



Fonte: Adaptado de Gatiboni (2003).

Devido à aplicação frequente, o solo agrícola contém uma grande quantidade de reservas de P, porém a maior parte da forma solúvel do P inorgânico é rapidamente absorvida após a aplicação de fertilizantes fosfatados e não pode ser utilizada pelas plantas (Igual *et al.*, 2011). O processo de adsorção de P pode ser estimado em cerca de 75% do total aplicado (Lin *et al.*, 2005).

A adsorção do P e a precipitação que ocorre no solo são geralmente dependentes do pH e do tipo de solo. Em solos ácidos, óxidos fracos e hidróxidos de alumínio e de ferro têm a capacidade de reter o P; já em solos alcalinos, a fixação ocorre devido à presença de cálcio, causando baixa eficiência na solubilização de fertilizantes fosfatados (Rezakhani *et al.*, 2019),

além do processo de adsorção, diferentes formas de P encontradas nos solos têm diferentes níveis de disponibilidade (Liang *et al.*, 2017).

A adsorção pode limitar a disponibilidade de P para as plantas e a dessorção pode causar perda de P dos solos (Lair *et al.*, 2009, Wang e Liang, 2014). Esta adsorção de P envolve uma série de processos específicos, como exemplo de fatores que afetam o fornecimento de fósforo (P) para as plantas são os argilominerais e óxidos de ferro e alumínio, onde apenas uma fração do P adsorvido fica disponível para as plantas (Gérard, 2016).

Os impactos da adsorção de P estão intimamente relacionados à sua dessorção, que influencia diretamente o suprimento de P da fase sólida para a fase líquida, bem como à capacidade tampão do solo, que também desempenha um papel significativo na disponibilidade de P no solo (Wang e Liang, 2014). Portanto, a compreensão dos processos de adsorção e dessorção de P é de igual importância para otimizar a taxa de utilização de P pelas plantas."

No solo, a composição dos estoques de P pode ser dividida em P lábil, moderadamente lábil e estável (Redel *et al.*, 2019). O P lábil do solo, ou seja, o P prontamente disponível, é a porção de P de ciclo rápido que atende às necessidades de P de curto prazo das culturas. A mineralização da matéria orgânica do solo prontamente converte P moderadamente lábil (P de ciclagem lenta) em P lábil. O P estável (P ocluído) refere-se à forma em que ele se torna inacessível para as plantas devido à sua ligação com minerais do solo, como argilas e óxidos de ferro e alumínio. Essa ligação é tão forte que o fósforo se mantém indisponível para as plantas ao longo de décadas e não pode ser utilizado pelas culturas. permanece no solo por décadas e não pode ser utilizado pelas culturas (Niederberger *et al.*, 2019). Os níveis de P solúvel nos solos são tamponados pela dessorção do P lábil, mineralização do P orgânico e dissolução do P mineral.

Entender os fenômenos básicos da dinâmica do P no solo, conhecendo e compreendendo as interações do elemento com o solo e a dinâmica de suas formas disponíveis para a planta no ambiente, é a chave para a tomada de decisão sobre a necessidade de adicionar e definir as doses e os modos de aplicação de fertilizantes fosfatados (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Raij, 2011).

As plantas captam P preferencialmente na forma de íons ortofosfato primários ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) e secundários ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), cuja predominância na solução do solo depende principalmente do pH, onde estão presentes em quantidades iguais em pH 7,2. Em solos com pH abaixo de 7,2 (ou seja, solos mais ácidos), o íon  $\text{H}_2\text{PO}_4$  se torna a forma predominante de fósforo. Essa forma de P é mais facilmente absorvida pelas raízes das plantas. À medida que o pH do solo se torna

mais ácido, a concentração do íon  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  aumenta, tornando-o mais disponível no solo. Essa forma de fósforo é menos facilmente absorvida pelas plantas, tornando-o menos disponível. (Marschner, 2012).

Nos tecidos vegetais, a concentração de P é de cerca de 20  $\mu\text{M}$ , muito maior do que na solução do solo, geralmente abaixo de 10  $\mu\text{M}$ . Portanto, as plantas desenvolveram um sistema de transporte ativo do tipo simporte  $\text{Pi}/\text{H}^+$  de alta afinidade, executado por um gradiente de concentração de uma proteína codificada por um gene pertencente à família PHT1 (transportador de fosfato-PHT), cuja inibição da expressão leva a redução significativa absorção de Pi (Shin *et al.*, 2004).

O P é um macronutriente que participa de vários processos do metabolismo vegetal (Nicchio, 2015), existe em compostos de suma importância nas células vegetais, como açúcares fosfatados, mediadores da respiração e da fotossíntese e fosfolipídios que compõem as membranas vegetais, também participa do metabolismo da adenosina trifosfato (ATP) vegetal, que é a principal fonte de energia em processos como fotossíntese e divisão celular (Taiz *et al.*, 2017).

O crescimento e o desenvolvimento de plantas deficientes em P são reduzidos desde o estágio inicial de plântula e, dependendo da severidade, os efeitos negativos podem persistir durante o desenvolvimento das sementes e frutos (Stauffer; Sulewski, 2004).

O P é um elemento móvel nos tecidos vegetais, pois está intimamente relacionado a diversos processos fisiológicos das plantas, concentrado nas partes mais ativas do crescimento. A deficiência desse nutriente causa atrofia no crescimento de toda a planta, atraso na emergência das folhas, folhas malformadas de coloração verde-escura, nervura central arroxeadas e manchas necróticas em áreas de tecido morto (Taiz *et al.*, 2017) que podem levar a alterações no aparato fotossintético, diminuição da taxa de assimilação do  $\text{CO}_2$ , modificações na regulação de genes relacionados à fotossíntese e fotoinibição do fotossistema II (Hernández; Munné-Bosch, 2015).

O desenvolvimento da parte aérea da planta depende da formação e crescimento do sistema radicular, e a planta necessita de ampla disponibilidade de P no solo já no início do crescimento, pois sua capacidade é baixa nas fases iniciais. pesquisa de campo (Hansel, 2013).

Em condições de adubação adequada, o aporte de P ao solo favorece o uso mais eficiente da água e, portanto, o aproveitamento de outros nutrientes (Guimarães *et al.*, 2011). Castro *et al.* (2016) indicaram que em termos de quantidade, o P é o nutriente menos necessário no cultivo do milho em comparação com o nitrogênio e o potássio, mas é essencial para a produção de

grãos. Por outro lado, o aumento da dose de P pode aumentar a produtividade total de grãos (Ali *et al.*, 2022).

Para absorção adequada do P, crescimento e produtividade da cultura e, finalmente, alta eficiência da aplicação, os fertilizantes fosfatados devem ser adequadamente incorporados ao solo, permitindo um maior contato entre as raízes da planta e o nutriente, minimizando a exposição do P a compostos que propiciem a adesão, principalmente óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Sousa *et al.*, 2004). Vários autores já relataram o efeito da fertilização fosfatada na produtividade do milho e outras culturas (Resende *et al.*, 2006; Guimarães *et al.*, 2011; Castro *et al.*, 2016).

### 1.2.3 MÉTODOS DE APLICAÇÃO

Entender os fenômenos básicos da dinâmica do P no solo, conhecendo e compreendendo as interações do elemento com o solo e a dinâmica de suas formas disponíveis para a planta no ambiente, é a chave para a tomada de decisão sobre a necessidade de adicionar e definir as doses e os modos de aplicação de fertilizantes fosfatados (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008 ; Raij, 2011).

Diferentes métodos de aplicação de P irão afetar a utilização do nutriente pelas culturas, alterar a dinâmica e acumular P no perfil do solo (Hansel *et al.*, 2017). De forma geral, o P é aplicado todo no sulco de plantio utilizando implementos agrícolas como as plantadoras, essa forma de aplicação de fertilizante vem sendo usada com mais frequência principalmente devido as perdas de P por adsorção, e nesse método o fertilizante fica mais próximo da semente (Coelho *et al.*, 2019b). Entretanto, existem outras formas de aplicação que vem sendo utilizadas com sucesso, como aplicações em área total e fracionadas.

As formas de aplicação merecem destaque, pois o P pode ser aplicado a lanço, com ou sem incorporação, no sulco de plantio, em covas, podendo apresentar diferentes resultados, dependendo se a cultura trabalhada for mais ou menos exigente em P. No estudo de Brevilieri (2013), constatou-se a ocorrência de acúmulo de fósforo na faixa de 0 a 5 cm do solo. Além disso, verificou-se que o sistema radicular desempenha um papel na redistribuição desse fósforo para camadas mais profundas.

A suplementação mineral de P para as plantas é determinada pela capacidade do solo em repor o P na solução do solo, a qual depende do poder tampão do solo e do manejo da fertilização fosfatada, além das condições ambientais e do solo que afetam a biodisponibilidade de P bem como o crescimento das raízes (Deith *et al.*, 2005).

Em função da baixa mobilidade do P no solo, a adição de fertilizantes na superfície do solo no sistema plantio direto, tem constantemente saturado os sítios de maior afinidade por P, o que pode ser observado nas diferenças do P previamente adsorvido (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008). Além disso, com a expansão da agricultura de precisão entre as propriedades, intensificou-se a aplicação superficial de nutrientes, contribuindo para que este processo ocorra (Hansel, 2014).

Nos últimos anos, tem havido uma crescente preocupação social em relação à disponibilidade de fósforo (P) para as plantas, devido à sua importância fundamental na agricultura e segurança alimentar (Baveye, 2015).

A dinâmica de nutrientes, aliado aos modos de aplicação e dosagem de fertilizantes fosfatados, provavelmente tenham sido as áreas mais estudadas em fertilidade do solo (Hansel, 2014), pois o modo de aplicação de fertilizantes fosfatados pode alterar a velocidade e a capacidade do fertilizante reagir no solo, bem como alterar a solubilização e disponibilização do P na solução do solo, tendo grande influência na determinação do grau de eficiência da adubação fosfatada (Brevilieri, 2012).

A baixa mobilidade do P no solo e a aplicação de P a lanço em superfície, ano após ano, no sistema plantio direto, têm, paulatinamente, saturado os sítios de maior afinidade por P, elevando os níveis de P destes solos (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008), reduzindo a deficiência, contudo, sem eliminá-la (Raij, 2011).

Diversos estudos têm sido realizados, buscando avaliar o modo mais eficiente de aplicação do P no solo, porém ainda não existe consenso nos resultados (Resende, 2013). Todavia existe consenso científico de que fatores como exsudatos radiculares e morfologia radicular, junto com a diversidade e funcionalidade microbiana podem contribuir para uma alta eficiência no uso de P. De fato, plantas e microrganismos desenvolveram mecanismos de mobilização de P, pela liberação de modificadores do pH do solo, liberação de ácidos orgânicos, quelatção de cátions e fosfatases extracelulares que orgânico P (Elhaissofi *et al.*, 2022).

#### **1.2.4 BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FÓSFORO**

Nos últimos anos, as características e os mecanismos do processo de solubilização do P têm sido extensivamente estudados (Li *et al.*, 2022). Acredita-se que as bactérias que solubilizam o P sejam capazes de dissolver fosfato insolúvel pela secreção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Kiprotich *et al.*, 2023).

Em solos alcalinos, os fosfatos podem precipitar para formar fosfato de cálcio, cuja solubilidade aumenta com a diminuição do pH do solo. Os microrganismos podem aumentar a disponibilidade de P ao secretar ácidos orgânicos que causam uma diminuição no pH do solo. Um aumento no pH do solo leva ao surgimento de formas divalentes e trivalentes de P inorgânico:  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  (Kalayu, 2019).

Diversos são os estudos que identificaram bactérias que realizam solubilização de fosfato, tais como: *Arthrobacter chlorophenolicus*, *Arthrobacter defluvii*, *Arthrobacter phenanthrenivorans*, *Arthrobacter sp*, *Bacillus acidicer*, *Bacillus megaterium*, *Burkholderia*, *Duganella sp*, *Kurthia zopfii*, *Kurthia zopfii*, *Leifsonia shinshuensi*, *Massilia putida*, *Paenibacillus polymyxa*, *Pseudoduganella*, *Pseudomonas frederiksbergensis*, *Rhizobium leguminosarum*, *Rhodanobacter sp*, *Rhodococcus opacus*, *Rhodococcus sp*, *Streptomyces prasinopilosus*, *Streptomyces rishiriensis*, *Telluria mixta*, *Variovorax paradoxos* (ZHENG et al., 2018).

A solubilização de P inorgânico no solo por bactérias, ocorrem por meio de mecanismos enzimáticos ou não, com a liberação de ácidos orgânicos, e  $\text{H}^+$  (Hsu et al., 2015). Os ácidos orgânicos são sintetizados no espaço periplasmático via oxidação direta (Zhao et al., 2014). A liberação dos ácidos orgânicos no meio ambiente é acompanhada por uma redução significativa do pH. A rota metabólica da produção desses ácidos orgânicos é via à fermentação na presença de fontes de carbono orgânico (por exemplo, glicose, sacarose) ou respiração oxidativa (Schneiderley et al., 2019).

A eficiência da solubilização depende da natureza e da eficácia dos ácidos secretados, pois os ácidos di e tricarboxílicos são mais eficientes do que os ácidos monobásicos e aromáticos, e os ácidos fenólico, cítrico e fumárico são menos eficientes na solubilização do fosfato do que os ácidos alifáticos. Entre os ácidos orgânicos que solubilizam os fosfatos estão principalmente os ácidos 2-cetoglucônico, acético, adípico, butírico, cítrico, fumárico, glicólico, glucônico, glioxálico, glutárico, láctico, málico, malônico, oxálico, propiônico, succínico, tartárico sendo o ácido glucônico e o ácido 2-cetoglucônico os agentes solubilizantes mais comuns para fosfatos minerais (Timofeeva et al., 2022).

Dentre os mecanismos de disponibilidade de P, o mais típico é através da secreção de ácido glucônico (Na e Moe, 2016). O gluconato é o principal ácido orgânico produzido pela oxidação direta da glicose pela enzima glicose desidrogenase (Naik et al., 2008) e é regulado pelo gene quinona proteína glicose desidrogenase (*gcd*).



Essas enzimas estão presentes em populações bacterianas que tem capacidade de solubilizar o P inorgânico, sua biossíntese requer o cofator redox pirroloquinolina quinona, um operon, composto por 11 genes (An e Moe, 2016; Zhou *et al.*, 2018), cofator este que são produzidos exclusivamente por microrganismos, que são capazes de atuar na solubilização do fosfato inorgânico (Meyer *et al.*, 2011) sendo indispensável para a produção do ácido glucônico (Zhou *et al.*, 2018).

Microrganismos solubilizadores de fosfato estão ganhando importância devido às suas vantagens, como segurança ambiental, baixo custo atrelada a elevada eficiência (Billah *et al.*, 2019; Amri *et al.*, 2023). Foi demonstrado em estudo que a inoculação com microrganismos solubilizadores de fosfato aumenta o rendimento das plantas e a absorção de P tanto em ~~vases~~ condições controladas de luz e temperatura (casa-de-vegetação) quanto em campo (Wang *et al.*, 2015).

O uso de biofertilizantes fosfatados é uma abordagem promissora para alavancar a produção de alimentos e aumentar a produtividade das culturas. Microrganismos que solubilizam fosfato podem aumentar o crescimento das plantas aumentando outros mecanismos de promoção de crescimento tais como: a eficiência da fixação biológica de nitrogênio, sintetizando ou induzindo a planta a produzir hormônios vegetais e aumentando a disponibilidade de certos micronutrientes como zinco e ferro (Wani *et al.*, 2007).

### **1.2.5 BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**

O P desempenha um papel importante no comprimento e no volume das raízes, o que amplia o potencial de absorção de nutrientes, protege as plantas de doenças e é necessário para a formação de sementes e maturação da cultura (Zhihui *et al.*, 2016)

A deficiência reduz significativamente o crescimento da planta. Portanto, a utilização de bactérias solubilizadoras de fosfato tem sido considerado uma alternativa ecologicamente correta para a correção do P no solo. No entanto, a literatura sugere que a eficiência *in situ* dos organismos pode não ser promissora, que a co-inoculação pode aumentar as atividades solubilização do P (Sharma *et al.*, 2013). A disponibilidade limitada de P em muitas terras aráveis é um desafio que precisa ser superado quando se pensa em aumentar a produtividade das culturas. Muitos pesquisadores exploraram o uso de bactérias que solubilizam fosfato para melhorar a disponibilidade de P no solo e disponibilizando-o para as plantas.

Em seu estudo, Elhaisoufi *et al.* (2020) mostraram que a inoculação com *Pseudomonas* sp. aumentou o comprimento e o volume do sistema radicular do trigo, bem como o P disponível ao redor da rizosfera. Quando as plantas foram cultivadas em combinação com o isolado selecionado, a biomassa da parte aérea, a absorção de nutrientes e o teor de clorofila foram consideravelmente aumentados. *Enterobacter* spp com potencial em solubilizar fosfato foi isolado por Lucero *et al.* (2021) e ao seu utilizado como bioinoculante promoveu o crescimento de plantas de milho e soja aumentando a capacidade de solubilização de fosfato. Em experimento recente, You *et al.* (2020) relataram que *Burkholderia cenocepacia* (CR318) exibiu solubilização de fosfato inorgânico e potássio, aumentando de modo significativo o crescimento de plantas de milho pela solubilização de fosfato tricálcico inorgânico em condições de estufa.

Há pouca informação sobre os efeitos da introdução de bactérias nativas com potencial em solubilizar fosfato no campo, incluindo seus efeitos nas comunidades microbianas locais. Em um experimento, Song *et al.* (2021) relatou que a inoculação com um consórcio contendo diferentes isolados solubilizadores de fosfato (*Burkholderia*, *Chryseobacterium*, *Klebsiella* e *Pseudomonas*) pode promover o crescimento de *Ulmus chenmoui*, além de regular a sua comunidade microbiana de rizosfera, de modo que a inoculação com essas cepas bacterianas pode promover o cultivo eficiente e a produção de material vegetal de alta qualidade.

### 1.2.6 BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS

Fertilizantes minerais contendo P são usados na agricultura com manejo convencional para cultivar plantas e atender à demanda global de alimentos. O uso excessivo pode levar à poluição das águas superficiais e subterrâneas, eutrofização, esgotamento da fertilidade do solo. Portanto, a inoculação de via sementes, solo ou após a culturas implementada no campo com bactérias que solubilizam fosfato como biofertilizante é uma abordagem promissora para aumentar a disponibilidade de P no solo e a produtividade das culturas sem representar danos ambientais (Alori; Glick e Babalola, 2017).

A pesquisa mostra que a utilização de bioinoculantes bacterianos é uma solução biológica alternativa eficiente que pode ser utilizado visando uma agricultura mais sustentável, sendo a aplicação das bactérias ao solo, como biofertilizantes, uma maneira eficaz de aliviar a deficiência de P do solo (Sharma *et al.*, 2013). Oteino *et al.* (2015) relataram que cepas endofíticas de *Pseudomonas* exibem boa atividade de solubilização de fosfato e são expressas em condições limitadas de fosfato para promover o crescimento da planta.

No mercado, já há disponibilidade de produtos à base de bactérias solubilizadoras de fosfatos, o que indica resultados importantes no aumento de produção e qualidade das plantas na lavoura (Zucareli *et al.*, 2018; Zamariolli *et al.*, 2019).

No Brasil, a equipe da Embrapa Milho e Sorgo vem pesquisando e selecionando MSPc há quase 20 anos (Viera Velloso *et al.*, 2020; Sousa *et al.* 2021), culminando no desenvolvimento do inoculante comercial BiomaPhos®, desenvolvido em parceria com a empresa Simbiose/Bioma, do Paraná, em 2019. Este inoculante contém as estirpes *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119), capazes de aumentar a eficiência do uso de P para as plantas, o que pode resultar no aumento da produtividade e, no futuro, na utilização de menores doses de fertilizantes fosfatados. Estas duas estirpes foram isoladas de áreas agrícolas distintas no País, onde prevalece o cultivo de cereais (Oliveira-Paiva *et al.*, 2009; Abreu *et al.*, 2017).

A estirpe de *B. megaterium* (CNPMS B119) foi isolada da rizosfera de milho, e tem capacidade de solubilizar fosfatos de cálcio e de rocha e produzir fosfatase, enquanto a estirpe de *B. subtilis* (CNPMS B2084) é endofítica, solubiliza fosfato de cálcio e ferro e apresenta alta produção de ácido glucônico e enzima fitase (Abreu *et al.*, 2017; Oliveira-Paiva *et al.*, 2020a; Velloso *et al.*, 2020). 88% do P presente no solo é encontrado na forma orgânica, ou seja, indisponível para absorção pelas raízes (Parentoni, 2019).

A inoculação com BiomaPhos na semente de milho, juntamente com a adubação reduzida de superfosfato triplo, aumentou a capacidade de promover a absorção de P pelas raízes na cultura, o que resultou em 10% no aumento da produção por hectare. Logo, a ação das bactérias solubilizadoras *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis* presentes no produto, disponibilizam o P para sua absorção pelas raízes (Oliveira-Paiva *et al.*, 2020b).

Além disso, estas estirpes possuem propriedades distintas de promoção de crescimento, como a produção de AIA, sideróforos, exopolissacarídeos e formação de biofilme, que estimulam o aumento da superfície radicular, especialmente de raízes mais finas (Velloso *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2021). Bactérias do gênero *Bacillus* possuem ainda a capacidade de formar endósporos, permitindo que se adaptem a condições abióticas extremas, como temperatura, pH, radiação, dessecação, luz ultravioleta ou exposição a pesticidas.

Em 1835, o cientista Ehrenberg realizou a primeira descrição de uma bactéria que ficou conhecida como "*Vibrio subtilis*". Mais tarde, em 1872, Cohn reclassificou o organismo como *Bacillus subtilis* (Gordon, 1981), designando-o como a espécie-tipo do gênero *Bacillus*. O gênero *Bacillus* engloba bactérias gram-positivas que utilizam compostos químicos como fonte

de energia, apresentando a capacidade de produzir endósporos altamente resistentes ao calor. Essas bactérias desempenham um papel significativo na produção de ácido indol-acético, amônia e sideróforos, além de demonstrarem a habilidade de realizar o controle biológico de patógenos, afetando tanto os patógenos foliares quanto radiculares. Além disso, são notáveis pela sua capacidade de solubilização de fosfato (Kuan *et al.*, 2016; Ramakrishna; Yadav e Li, 2019).

Além de sua função na solubilização do P, bactérias do gênero *Bacillus* também manifestam outros mecanismos que contribuem para o crescimento vegetal. Entre eles, destacam-se a produção de hormônios vegetais, enzimas e proteção contra patógenos, bem como a promoção da expansão radicular (Ferreira *et al.*, 2022). Esses mecanismos, responsáveis por estimular o desenvolvimento radicular, são fundamentais para aumentar a área de solo explorada, resultando em um impacto direto na absorção de água e nutrientes pelas plantas (Batista *et al.*, 2018).

O *Bacillus subtilis* e o *Bacillus megaterium* são bactérias capazes de produzir endósporos altamente resistentes ao calor, além de apresentarem facilidade de manipulação e versatilidade em suas aplicações. Essas características favorecem a fabricação de inoculantes, permitindo que sejam combinados com outros agentes de proteção agrícola (Radhakrishnan, Hashem, Abd Allah, 2017).

Microrganismo é amplamente utilizado na produção de enzimas extracelulares, em vacinação e suplementação de alimentação animal, além de ser empregado na agricultura como agente de controle biológico e como rizobactéria promotor do crescimento de plantas (Kovacs, 2019; Alves *et al.*, 2018).

A promoção de crescimento ocasionada por *B. subtilis* é resultado de vários mecanismos, incluindo o aumento da fixação de nitrogênio, a solubilização de nutrientes, a síntese de fitormônios e a melhoria das condições do solo. Além disso, essa associação benéfica proporciona benefícios indiretos, como a supressão de microrganismos maléficos no ambiente circundante (Tsotetsi *et al.*, 2022).

Adicionalmente, os isolados de *B. subtilis* também possuem a capacidade de regular a atividade hormonal das plantas, conforme relatado por Samaras et al. (2022). Essa regulação hormonal influencia o crescimento radicular por meio da síntese de auxina, giberelina e citocinina, levando ao aumento fisiológico de metabolitos que tornam o sistema radicular mais sensível às condições externas e facilitam a percepção e absorção de nutrientes (NUNES *et al.*, 2023).

O *B. megaterium*, além de atuar na solubilização do P, apresenta diversos mecanismos que contribuem para o crescimento das plantas. Esses mecanismos incluem a solubilização de potássio, a produção de fitormônios, enzimas e a capacidade de fornecer proteção biológica contra patógenos. Além disso, por meio de mecanismos secundários, essa bactéria estimula o sistema radicular, resultando em um aumento da absorção de outros nutrientes e água (Gupta *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2018).

O sucesso da utilização de *B. megaterium* em inoculantes é atribuído às suas características biológicas, especialmente a capacidade de formação de estruturas de resistência em condições desfavoráveis. Essa característica assegura uma maior possibilidade de sobrevivência desta rizobactéria nos bioprodutos que a contenham (Basnet *et al.*, 2022).

O crescimento e desenvolvimento dessa bactéria ocorre em uma faixa de pH entre 5,5 e 8,5. A temperatura ideal para seu crescimento é de 28-30°C, com um mínimo de 5-20°C e um máximo de 45-55°C (Logan e De Vos, 2009).

## CAPÍTULO II

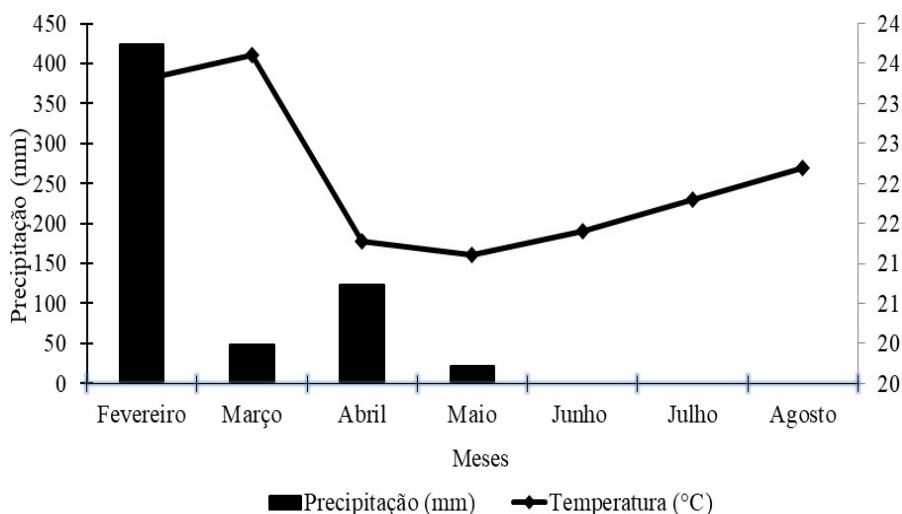
### 2 MATERIAL E MÉTODOS

#### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E DA ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi realizado na área experimental da propriedade Fazenda Lagoa da Capa do proprietário Claudio Castro Cunha do Grupo 3C, Rodovia de acesso BR452 a BR 262, 8km a direita Zona Rural, no município de Patos de Minas, CEP:38170-000 que estava localizado entre as coordenadas 19° 26' 13" de Latitude Sul, 47° 21' 23" de Longitude Oeste, na altitude aproximada de 1000.

O clima da região foi classificado como tropical quente e úmido (Aw), de acordo com a classificação de Kopen e Geiger atualizada por Beck *et al.* (2018), com precipitação média anual de 1479 mm e temperatura média anual de 21,5°C. No período avaliado ocorreu precipitação acumulada de 616 mm e temperatura média de 22,09°C (Figura 2).

Figura 2. Precipitação pluviométrica e temperaturas médias mensais do ar no período entre fevereiro e agosto/2022, obtido junto ao Instituto Nacional de Meteorologia, durante a condução da pesquisa do Experimento.



Fonte: Elaboração do próprio autor

O tipo de solo que predomina no local é o Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (Santos *et al.*, 2018), que apresenta na camada de 0 a 0,20 m: 450, 250 e 300 g kg<sup>-1</sup> de argila, areia e silte, respectivamente, 5,8 de pH em H<sub>2</sub>O; 8,0 mg dm<sup>-3</sup> de P (Mehlich-1), 25,8 mg dm<sup>-3</sup> de P remanescente, 98 mg dm<sup>-3</sup> de K; 1,16 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca; 0,34 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Mg; 0,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Al, 1,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de H+Al, 1 mg dm<sup>-3</sup> de S e 18,0 g kg<sup>-1</sup> de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica de 4,04 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e saturação por bases (V%) de 56%. Com

relação aos micronutrientes, observou-se 0,14 mg dm<sup>-3</sup> de B (Mehlich-1), 0,61 mg dm<sup>-3</sup> de Cu (Mehlich-1), 26 mg dm<sup>-3</sup> de Fe (Mehlich-1), 13,31 mg dm<sup>-3</sup> de Mn (Mehlich-1) e 0,33 mg dm<sup>-3</sup> de Zn (Mehlich-1).

## 2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, sendo avaliados sete tratamentos com aplicação adubação fosfatada de base no sulco de plantio (AFBSP) e do solubilizador de P (SP): T1 = Sem AFBSP e sem SP (Testemunha); T2 = Com AFBSP e sem SP; T3 = AFBSP + 0,75 ml do SP em área total; T4 = AFBSP + 150 ml do SP em área total; T5 = AFBSP + 225 ml do SP em área total; T6 = AFBSP + 300 ml do SP em área total; T7 = AFBSP + 150 ml do SP no sulco de plantio, todos sendo realizados com quatro repetições.

As aplicações em área total dos tratamentos T3 a T6 foram realizadas logo após a semeadura feita pela semeadora-adubadora, utilizando cilindros de CO<sub>2</sub> com uma barra de três metros de largura e seis bicos tipo leque, regulados com base na pressão do equipamento, vazão por bico, largura da barra e velocidade de caminhamento (Figura 2), enquanto que a aplicação do T7 foi realizada diretamente no sulco de plantio aberto com uma régua de 1 metro de largura, utilizando um cilindro de CO<sub>2</sub> com uma barra de três metros, com a semente sendo semeada manualmente correspondendo a população desejada.

A semente de milho utilizada na semeadura foi o híbrido da empresa Pioneer P3707YHV, recomendada para cultivo na região com população de 60.000 plantas por hectare. Este híbrido é geneticamente modificado, resistente às principais pragas na cultura do milho e ao princípio ativo glifosato, apresentando ciclo para safrinha de 160 dias onde o plantio do experimento ocorreu no dia 28/02/2022 e colhido no dia 06/08/2022.

Figura 3. Aplicação dos tratamentos sendo realizada por com uma barra de três metros de largura e seis bicos tipo leque, acoplado a um cilindro de CO<sub>2</sub>



Fonte: Patos de Minas – MG , 2022

As parcelas da área experimental foram compostas por seis linhas de cinco metros de comprimento cada, sendo as duas linhas centrais consideradas área útil.

As doses de adubo aplicadas na cultura do milho foram definidas com base na análise do solo e de acordo com a recomendação da Circular Técnica da Embrapa (EMBRAPA, 2008). A dose de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) recomendada foi de 16,5 kg ha<sup>-1</sup> de N, 78 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 0 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O. Aos 20 dias após o plantio realizou-se a adubação de cobertura, aplicando-se 200 kg ha<sup>-1</sup> de ureia (45% N) para fornecer 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, e 50 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio (KCl - 56% de K<sub>2</sub>O) para fornecer 28 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O.

Em relação a fonte de P avaliada, foi utilizado o MAP granulado contendo 11% de N e 52% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, onde não se realizou adubação de base na testemunha T1, e após o plantio foi realizado adubação de N manualmente com ureia (45% N). As pragas e doenças decorrentes na região foram monitoradas semanalmente desde o início do ciclo da cultura, quando se atingia o nível de controle através das tabelas de severidade fez-se o controle. Realizou-se uma 1ª aplicação aos 10 dias após o plantio, com Tiametoxam 141 g/L + Lambda - Cialotrina 106 g/L (Engeo Pleno™ S) na dose de 0,25 L ha<sup>-1</sup>, e fertilizante foliar Starter Mn dose de 2 L ha<sup>-1</sup>, Quantis 2 L ha<sup>-1</sup>. Aos 18 dias após o plantio realizou-se a 2ª aplicação, com Tiametoxam 141,0 g L + Lambda-cialotrina 106,0 g L (Engeo Pleno™ S) na dose de 0,25 L ha<sup>-1</sup>. Aos 48 dias realizou a 3ª aplicação com Tiametoxam 141,0 g L + Lambda-cialotrina 106,0 g L (Engeo Pleno™ S) na dose de 0,25 L ha<sup>-1</sup> + Azoxistrobina 200 g/L + Difenconazol 125 g/L (Priori top) na dose de 0,3 L ha<sup>-1</sup> e aos 60 dias realizou a 4ª aplicação de Azoxistrobina 200 g/L + Difenconazol 125 g/L (Priori top) na dose de 0,3 L ha<sup>-1</sup> e fertilizante foliar Starter Mn dose de 2 L ha<sup>-1</sup>, Quantis 2 L ha<sup>-1</sup>. Todas as aplicações foram realizadas com pulverizador de arrasto Jacto 2000, munido com pontas do tipo jato cônico vazio e regulado para aplicar 200 L ha<sup>-1</sup> de calda.

### 2.3 AVALIAÇÕES REALIZADAS

Foram coletadas 10 folhas por parcela, do terço basal da folha oposta e abaixo da primeira espiga (superior), excluindo a nervura central, coletada por ocasião do aparecimento da inflorescência feminina, para realização da análise do estado nutricional da planta (Figura 4) (adaptado de Martinez *et al.*, 1999). Estas folhas foram secas em uma estufa com ventilação forçada a uma temperatura entre 65 e 70 °C, por 72 horas, depois moídas em um moinho do tipo Wiley e encaminhadas para o laboratório para determinação do teor de nutrientes, seguindo os métodos descritos em Malavolta *et al.* (1997).



Figura 4. Coleta de folhas do terço basal da folha oposta e abaixo da primeira espiga (superior), excluindo a nervura central, para análise do estado nutricional da planta.



Fonte: Patos de Minas – MG, 2022

Foram coletadas cinco amostras de solo por tratamento utilizando a furadeira STIHL tipo “Saci” nas profundidades de 0 - 0,10, 0,10 – 0,20 e 0,20 - 0,30 m nas entre linhas de cada parcela experimental logo após a colheita do milho (Figura 5), para avaliar disponibilidade de nutrientes no solo observando seu comportamento em três profundidades para desenvolvimento das plantas.

Na análise química das amostras de solo foi quantificando os teores de N total pelo método de Kjeldahl (Tedesco *et al.*, 1985), P e K determinados a partir de digestão nítrico-perclórica (Bataglia *et al.*, 1983), Ca e Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Bataglia *et al.*, 1983), o carbono orgânico (C) por Walkley e Black modificado e o S por turbidimetria (Tedesco *et al.*, 1985). O conteúdo total de cada nutriente foi estimado a partir da porcentagem do nutriente presente em cada amostra, multiplicado pelo peso total de biomassa seca estimada.

Figura 5. Coleta de amostras de solo utilizando a furadeira STIHL tipo “Saci” nas profundidades de 0 a 0,30 m, para análise química de macronutrientes.



Fonte: Patos de Minas – MG , 2022

Foram colhidas as espigas nas duas linhas centrais de cada parcela experimental, deixando 0,5m de bordadura, para avaliar a produtividade da cultura, tendo os valores de massa de grãos pesadas em balança de precisão ( $\pm 0,01$  g), seguindo as Regras para Análises de Sementes-RAS (Brasil, 1992), sendo que os valores foram corrigidos para 13% de umidade e expressos em  $\text{kg ha}^{-1}$  (Figura 5).

Figura 6. Quantificação da produção nas linhas centrais de cada parcela experimental e determinação da umidade, para corrigir valores para 13% de umidade.



Fonte: Patos de Minas – MG , 2022

## **2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os dados foram submetidos a testes de normalidade e homogeneidade das variâncias e aditividade dos blocos, por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Em seguida foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F, e quando constatado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, com auxílio do Software Agroestat. Os valores relacionados à absorção de nutrientes e aos nutrientes presentes no solo foram submetidos à análise de regressão usando o Software SigmaPlot versão 12.5.

## CAPÍTULO III

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 são apresentados os resultados das análises foliares para os macronutrientes realizadas nos diferentes tratamentos. Analisando o nutriente P, é possível observar que o tratamento T1 possui o menor valor ( $1,20 \text{ g kg}^{-1}$ ), enquanto os tratamentos T6 e T7, não sendo estatisticamente diferentes do T2, T3, T4 e T5, apresentaram os maiores valores ( $2,30 \text{ g.kg}^{-1}$ ), ou seja, houve um aumento de aproximadamente 91,66% do teor de P no milho. Entretanto todos os valores ficaram abaixo dos níveis de suficiência preestabelecidos para a cultura que variam entre 25 e  $35 \text{ g.kg}^{-1}$  (Martinez *et al.*, 1999).

Tabela 1. Estado nutricional do milho safrinha observada através da análise foliar, após a aplicação de diferentes doses de solubilizadores de P, em Patos de Minas, MG.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
	.....g kg <sup>-1</sup> .....					
Sem AFBSP e sem SP	29,22 a*	1,20 b	12,25 b	4,32 d	2,26 d	0,97 b
Com AFBSP e sem SP	28,55 a	2,05 a	15,25 a	5,60 c	3,10 b	1,52 a
AFBSP+0,75 ml do SP (AT)	23,60 b	2,10 a	15,25 a	5,86 b	2,80 c	1,42 a
AFBSP+150 ml do SP (AT)	22,80 b	2,20 a	15,75 a	5,95 b	3,31 b	1,47 a
AFBSP +225ml do SP (AT)	19,22 c	2,22 a	15,00 a	6,14 a	3,50 a	1,60 a
AFBSP+300 ml do SP (AT)	23,95 b	2,30 a	14,75 a	6,39 a	3,42 a	1,60 a
AFBSP+150 ml do SP (S)	23,27 b	2,30 a	15,75 a	5,80 b	2,88 c	1,60 a
CV %	5,82	5,94	6,82	5,73	6,3	10,57

\*Médias seguidas por letras iguais minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), T1 = Sem AFBSP e sem SP (Testemunha); T2 = Com AFBSP e sem SP; T3 = AFBSP + 0,75 ml do SP em área total; T4 = AFBSP + 150 ml do SP em área total; T5 = AFBSP + 225 ml do SP em área total; T6 = AFBSP + 300 ml do SP em área total; T7 = AFBSP + 150 ml do SP no sulco de plantio; AT = Área total; S = Sulco de plantio; CV = Coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor



Os resultados obtidos neste estudo mostraram que a falta de adubação com P no solo diminuiu a absorção de todos os macronutrientes pela planta, exceto para o nitrogênio, e que a aplicação de solubilizador de P influenciou a absorção de N na folha.

Com relação aos demais macronutrientes, pode-se observar que o tratamento sem adubação fosfatada influenciou em ~~obteve os~~ menores valores de K, Ca, Mg, S e P, exceto para o N, que variou aproximadamente 10 g kg<sup>-1</sup> entre o maior valor (29,22 g kg<sup>-1</sup>) e o menor valor (19,22 g kg<sup>-1</sup>). Para o K, Ca, Mg e S, a variação entre o maior e menor valor dos tratamentos foi 3,5; 2,7; 1,24 e 0,63 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 1). Por outro lado, os tratamentos AFBSP +225ml do SP e AFBSP+300 ml do SP (área total) e AFBSP+150 ml do SP (sulco) apresentaram uma tendência de maiores valores para a maioria desses nutrientes.

As respostas das plantas à deficiência de P são complexas e variadas, dependendo de fatores como a espécie vegetal, o tipo de solo e as condições ambientais. Em geral, as plantas adotam mecanismos adaptativos para aumentar a absorção e a concentração interna de P em solos com baixo teor desse nutriente. Isso pode incluir a liberação de substâncias orgânicas que solubilizam o P, a expansão do sistema radicular e o aumento da atividade de transportadores de P nas células radiculares (Klamer *et al.*, 2019).

De maneira geral, as diferenças nos teores de nutrientes entre os tratamentos de controle e os demais tratamentos estão provavelmente relacionadas principalmente ao fator de diluição do nitrogênio pela biomassa vegetal. Em plantas de milho de maior potencial produtivo, os nutrientes presentes nos tecidos podem ser "diluídos" devido ao maior crescimento da planta. Esse fenômeno, conhecido como efeito diluição, é amplamente relatado na literatura, indicando que a concentração dos nutrientes é diluída à medida que a planta cresce (Jarrell e Beverly, 1981).

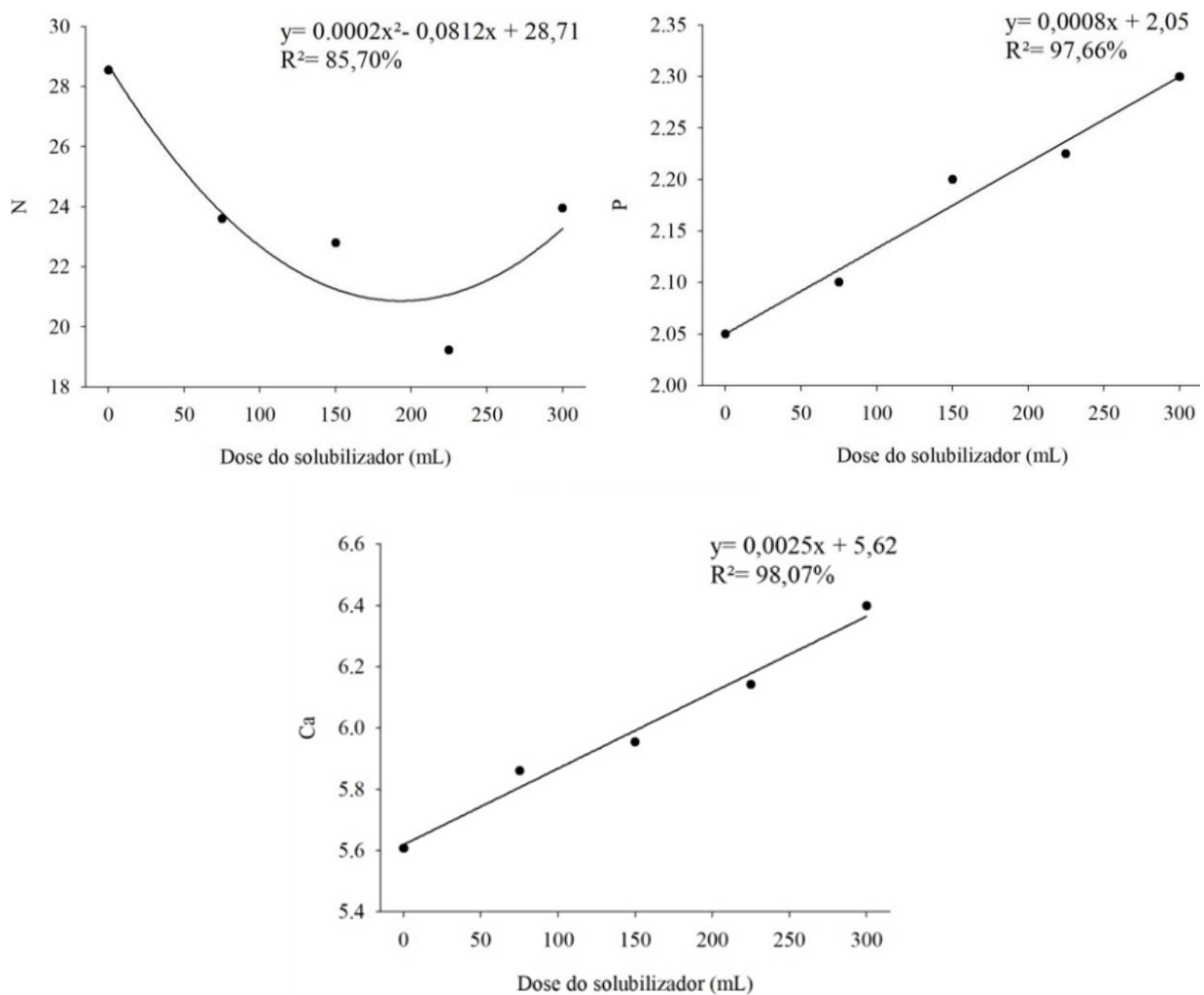
As pesquisas sugerem que a absorção interdependente de N e P pelas plantas está relacionada à disponibilidade e utilização de cada nutriente, entretanto, a deficiência de P pode aumentar a absorção de N pelas plantas, enquanto altos níveis de P podem suprimir a absorção de N. Os mecanismos subjacentes à absorção interdependente de N e P são complexos e envolvem múltiplos processos fisiológicos e moleculares, A regulação do crescimento e morfologia das raízes, bem como a expressão de transportadores de nutrientes e enzimas, podem influenciar a absorção de N e P e sua utilização nas plantas (Richardson e Simpson, 2011).

É importante entender a absorção e utilização interdependentes de N e P pelas plantas para otimizar as estratégias de manejo de nutrientes na agricultura e aumentar a produtividade

das culturas. Os resultados indicam que as plantas cultivadas com doses intermediárias de P absorvem a quantidade necessária de P, levando à redução da absorção de N. No entanto, quando as plantas são cultivadas em solos com doses baixas ou altas de P, ocorre um desequilíbrio nutricional, levando ao consumo de luxo de P e, conseqüentemente, maior absorção de N (Vance, Uhde-Stone e Allan, 2003).

A análise de regressão das doses do solubilizador de P aplicado no solo indicaram que para o N ocorreu um ajuste quadrático, onde os teores deste elemento obtidos na análise foliar do milho decresceram até a dose de 203 mL do solubilizador. Entretanto, a partir desta dose, verificou-se aumento significativo até a dose de 300 mL (Figura 7).

Figura 7. Curvas de regressão dos teores de N, P e Ca obtidos na análise foliar do milho, após aplicação de diferentes doses de solubilizadores de P, em Patos de Minas, MG.



Para o P e o Ca o ajuste da curva de regressão foi linear, indicando que com o aumento das doses do solubilizador no solo, também aumentou a disponibilidade destes nutrientes na

planta, este aumento dos teores de P e Ca foliar, indicam a capacidade dos microorganismos solubilizadores de P (MSP) solubilizam maior quantidade de P e Ca no solo para absorção pela planta.

Além disso, a co-solubilização de P e Ca por bactérias solubilizadoras de fosfato também pode melhorar a eficiência do uso de fertilizantes e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos. O P é um macronutriente vital necessário para vários processos fisiológicos nas plantas, incluindo fotossíntese, transferência de energia e síntese de DNA. A pesquisa realizada por Kayoumu *et al.* (2023) mostrou que aumentar o teor de P nas plantas pode ter várias vantagens, incluindo maior rendimento das culturas, melhor eficiência no uso de nutrientes e maior resistência a estresses ambientais.

Durante o processo de decomposição e mineralização das raízes das plantas, ocorre a liberação de ácidos orgânicos no solo. Esses ácidos têm o potencial de impactar a capacidade de adsorção de fósforo (P) pelo solo, ainda que de forma temporária. Esse fenômeno resulta em alterações nas quantidades de fósforo disponível para as plantas, afetando o índice de P-rem no solo. A liberação de ácidos orgânicos pelas raízes desencadeia um processo dinâmico que influencia a disponibilidade de fósforo no ambiente do solo, desempenhando um papel importante na nutrição das plantas e na ciclagem de nutrientes (CAMPOS *et al.*, 2021).

Em estudo avaliando o efeito da inoculação de produto à base de bactérias solubilizadoras de fosfato, *B. subtilis* e *B. megaterium*, e diferentes fontes de P no desenvolvimento e nutrição inicial do milho. Brito *et al.* (2022) demonstraram que a associação entre os inoculantes solubilizadores de P e fertilizantes fosfatados promoveu o crescimento da biomassa radicular. Houve interação significativa entre as fontes de P e o inoculante para diversas variáveis, incluindo diâmetro do colmo, massa seca da raiz e da parte aérea, relação parte aérea com a raiz, massa seca total, teor e acúmulo de P foliar, absorção de P e pH do solo, esse estudo corrobora os resultados encontrados no presente estudo.

A solubilização do P tem um papel crucial no desenvolvimento de plantas saudáveis e pode ter um impacto positivo na produção de culturas e na eficiência do uso de nutrientes, além de ajudar a enfrentar o desafio global de segurança alimentar. A pesquisa realizada sugere que o aumento dos teores de P nas lavouras pode reduzir a necessidade de fertilizantes fosfatados prejudiciais ao meio ambiente. O uso de inoculantes à base de bactérias solubilizadoras de fosfato é uma alternativa viável para incrementar o teor de P nas plantas e promover a agricultura sustentável. Estudos recentes mostraram que as bactérias solubilizadoras de fosfato, como *Bacillus megaterium* e *Bacillus licheniformis*, podem ser eficazes na solubilização de

fosfato, o que sugere o potencial dessas bactérias na promoção do crescimento das plantas e na produção de culturas saudáveis (Gouda *et al.*, 2018).

Estudos realizados no Paquistão e no Irã relataram que a inoculação com inoculantes contendo PSB aumentou os parâmetros morfológicos e o teor de P em plantas de tomate e trigo, respectivamente (Rezakhani *et al.*, 2019; Haq, 2020). Além disso, a aplicação de inoculante contendo PSB também demonstrou aumentar a produtividade das plantas, independentemente da forma de aplicação do adubo fosfatado na área. Os resultados destacam a importância do uso de PSB como uma alternativa sustentável e eficaz para melhorar o desempenho das plantas na agricultura (Hallama *et al.*, 2018). Esses dados corroboram os encontrados no presente estudo onde a aplicação do produto a base de bactérias solubilizadoras de fosfato aumentou a produtividade da cultura do milho.

Em relação à produtividade, verificou-se que todos os tratamentos que receberam o inoculante (T3 a T7) apresentaram uma média estatisticamente superior quando comparados aos controles. O incremento na produtividade foi de até 26% em relação ao controle não adubado (T1) e quase 8% em comparação ao controle que recebeu apenas o adubo mineral (T2) no tratamentos que receberam o produto solubilizador de fosfato nas doses superiores a 0,75ml (T1, T2, T3 e T4). Os resultados não foram influenciados pela forma de aplicação do adubo fosfatado na área, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Doses de solubilizadores de P e produtividade do milho safrinha no momento da colheita, em Uberaba, MG.

Tratamentos	Produtividade do milho safrinha
	kg ha <sup>-1</sup>
Sem AFBSP e SP	1671 d
Com AFBSP e SP (AT)	1968 c
AFBSP+0,75 ml do SP (AT)	2011 b
AFBSP+150 ml do SP (AT)	2053 a
AFBSP +225 ml do SP (AT)	2086 a
AFBSP+300 ml do SP (AT)	2098 a
AFBSP+150 ml do SP (S)	2121 a
CV %	1,88

\*Médias seguidas por letras iguais minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05),

T1 = Sem AFBSP e sem SP (Testemunha); T2 = Com AFBSP e sem SP; T3 = AFBSP + 0,75 ml do SP em área total; T4 = AFBSP + 150 ml do SP em área total; T5 = AFBSP + 225 ml do SP em área total; T6 = AFBSP



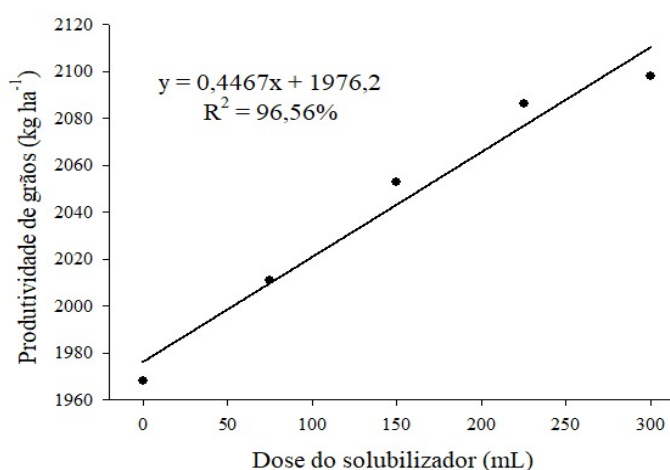
+ 300 ml do SP em área total; T7 = AFBSP + 150 ml do SP no sulco de plantio; AT = Área total; S = Sulco de plantio; CV = Coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor

A análise de regressão para as doses de solubilizadores de P utilizadas mostraram que houve um ajuste linear, onde o aumento das doses proporcionou o aumento de produtividade até a dose a AFBSP+300 ml em área total (AT), de 2098 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 8). Este comportamento comprova que a presença de bactérias solubilizadoras de fosfato pode aumentar o crescimento e o rendimento de plantas, além de aumentar a absorção de nutrientes e a resistência a vários estresses bióticos e abióticos.

Estudos realizados por Kaur e Reddy (2013), comprovaram que a inoculação do milho com as cepas *Pantoea cypripedii* e *Pseudomonas plecoglossicida* resultou em um aumento significativo no rendimento da cultura e na absorção de P total. Leggett *et al.* (2015) também com milho, evidenciaram um aumento significativo no rendimento de grãos, quando inoculado com a cepa *Penicillium bilaiae*. Estes estudos evidenciaram que o uso de PSB como biofertilizante é promissor para aumentar o rendimento do milho e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos, minimizando o impacto ambiental.

Figura 8. Análise de regressão da produtividade, mostrando que houve ajuste linear da produtividade com o aumento das doses aplicadas de solubilizador de P, em Patos de Minas, MG.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Ao analisar os atributos químicos do solo após a aplicação de doses de solubilizador de P, foram observadas diferenças significativas apenas para o K, com maiores valores na camada superficial (0-10 cm) no tratamento que recebeu AFBSP + 150 ml do SP em área total (T4), e menores valores nos tratamentos sem AFBSP e SP (T1) e com AFBSP e sem aplicação de solubilizador (T2) (Tabela 3). Com base nos resultados da tabela e considerando os diferentes

tratamentos aplicados, podemos observar algumas tendências nos atributos químicos do solo relacionados ao cultivo de milho. Primeiramente, a comparação entre o tratamento T1 (sem AFBSP e SP) e os demais tratamentos nos permite inferir que a aplicação de AFBSP não teve um efeito significativo nos atributos químicos do solo, exceto por uma ligeira redução no teor de potássio (K) no tratamento T2.

Tabela 3. Doses de solubilizadores de P e relações com os atributos químicos do solo em áreas com milho safrinha, nas profundidades de 0 a 30 cm, em Patos de Minas, MG.

Tratamento	Atributos químicos							
	pH	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
	H <sub>2</sub> O	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>						%
Tratamento (T)								
Sem AFBSP e SP	5,77	0,18 c	2,97	1,04	2,65	4,19	6,84	60,75
Com AFB e SP (AT)	5,69	0,17 c	2,63	0,86	2,84	3,66	6,50	55,67
AFBSP+0,75 ml do SP (AT)	5,67	0,21 b	2,73	0,75	2,77	3,69	6,46	55,83
AFBSP+150 ml do SP (AT)	5,73	0,25 a	2,78	0,90	2,60	3,93	6,57	59,58
AFBSP +225 ml do SP (AT)	5,48	0,20 b	2,20	0,66	3,20	3,06	6,27	49,25
AFBSP+300 ml do SP (AT)	5,48	0,21 b	2,58	0,61	3,31	3,40	6,71	50,75
AFBSP+150 ml do SP (SP)	5,51	0,20 b	2,54	0,65	3,13	3,39	6,52	52,08
Profundidade (P)								
10	5,76 a	0,22 a	3,08 a	0,92 a	3,33 a	4,22 a	6,77 a	62,03 a
20	5,61 b	0,19 b	2,63 b	0,79 b	2,91 b	3,61 b	6,53 b	54,96 b
30	5,49 c	0,19 b	2,18 c	0,65 c	2,55 c	3,02 c	6,36 c	47,53 c
Teste F e interação T x P								
T	2,46 <sup>ns</sup>	3,27*	1,04 <sup>ns</sup>	1,45 <sup>ns</sup>	1,81 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	1,93 <sup>ns</sup>
P	56,07*	3,85*	110,77*	79,92*	150,34*	122,9*	9,50*	404,97*
T x P	1,45 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	1,28 <sup>ns</sup>	1,00 <sup>ns</sup>	1,01 <sup>ns</sup>	1,17n <sup>s</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	1,94 <sup>ns</sup>
CV% T	4,93	24,84	31,04	37,17	24,78	32,23	17,54	19,86
CV% P	1,73	19,09	8,56	10,34	5,79	7,88	5,36	3,48

\* Médias seguidas por letras iguais minúsculas na coluna comparam os tratamentos em cada profundidade, enquanto que as letras maiúsculas comparam o tratamento entre profundidades, que não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), CV% = Coeficiente de variação; T1 = Sem AFBSP e SP (Testemunha); T2 = Com AFBSP; T3 = AFBSP + 0,75 ml do SP em área total; T4 = AFBSP + 150 ml do SP em área total; T5 = AFBSP

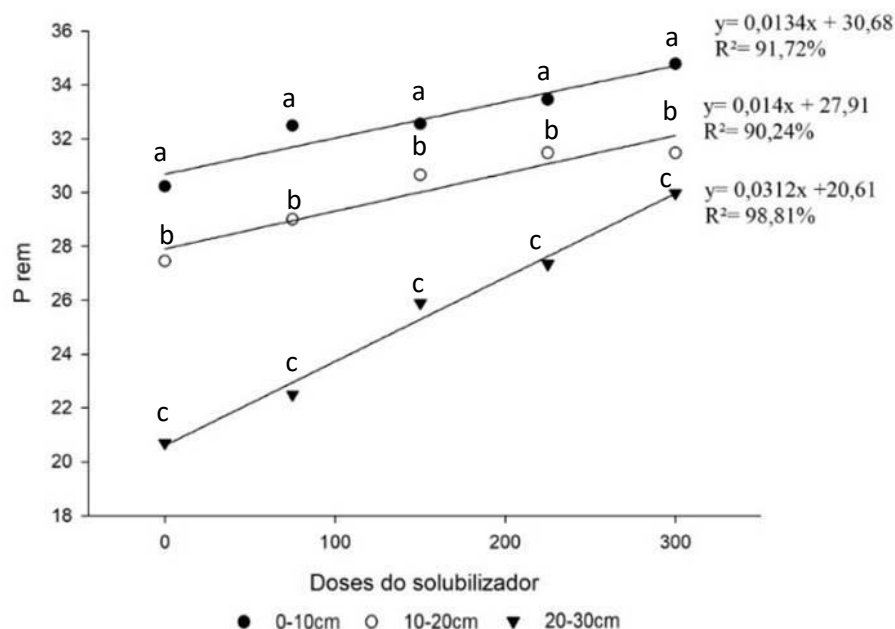
+ 225 ml do SP em área total; T6 = AFBSP + 300 ml do SP em área total; T7 = AFBSP + 150 ml do SP no sulco de plantio; AT = Área total; S = Sulco de plantio; CV = Coeficiente de variação,

Fonte: Elaboração do próprio autor

No entanto, quando combinamos a aplicação de AFBSP com diferentes quantidades de SP em área total (tratamentos T3 a T6), observamos variações nos atributos químicos do solo. O tratamento T4, que recebeu 150 mL/ha (dose comercial) do SP, se destacou ao apresentar os maiores teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Isso indica que a adição de SP nessa quantidade contribuiu para um aumento na disponibilidade desses nutrientes no solo, provavelmente beneficiando o crescimento e desenvolvimento do milho.

Com relação ao P-remanescente, houve interações significativas entre as doses de solubilizador e as profundidades avaliadas, e o aumento das doses resultaram em maior disponibilidade deste nutriente no solo para a absorção da planta, conforme evidenciado pela análise de regressão, onde ocorreu um ajuste linear (Figura 9).

Figura 9. Análise de regressão e equações do P remanescente (P rem) no solo, nas profundidades de 0 a 30 cm, após aplicação das doses de solubilizadores de P.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A utilização de bactérias solubilizadoras de fosfato aumentam a eficiência da utilização de adubos minerais fosfatados (Sahandi *et al.*, 2019). O microbioma presente no solo recicla os nutrientes para o solo pela decomposição da serapilheira (folhas e raízes), que são processos-chave que ligam a nutrição de P da planta e do solo (Maranguit *et al.*, 2017). Além disso, a lise

celular microbiana durante condições de estresse libera esse P no solo, que é absorvido por plantas e outros organismos do solo (Butterly *et al.*, 2009).

O maior aporte de biomassa microbiana, atrelado a maior eficiência dos adubos introduzidos na plantação podem explicar o aumento de P-remanescente encontrado nos resultados apresentados. Nossos resultados divergem dos encontrados por Liu *et al.* (2022) que ao inocular a cepa *Klebsiella* ZP-2 o P-remanescente diminuiu em todas as concentrações testadas.

## 4 CONCLUSÃO

A aplicação do solubilizador em área total ou no sulco proporcionou maior disponibilidade de P na planta, quando comparado à testemunha sem a aplicação do produto;

Houve aumento significativo da disponibilidade de P no solo com o aumento das doses do solubilizador no solo em área total;

A produtividade foi semelhante entre si e significativamente superior nos tratamentos onde aplicou-se de 150 a 300 ml de solubilizador em área total ou no sulco de plantio, quando comparado aos outros tratamentos;

## 5 REFERÊNCIAS

- ABREU, C. S. de; FIGUEIREDO, J. E. F.; OLIVEIRA, C. A.; SANTOS, V. L. dos; GOMES, E. A.; RIBEIRO, V. P.; BARROS, B. de A.; LANA, U. G. de P.; MARRIEL, I. E. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017. Acesso em: 13 jun. 2023.
- 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, p. 971, 2017. doi: 10.3389/fmicb.2017.00971. Acesso em: 11 jun. 2023.
- Alves, K. C. S., Almeida, M. E. M., Glória, J. C., Santos, F. A., Pereira, K. D., Castro, D. P., & LUIS, M. *Bacillus subtilis*: uma versátil ferramenta biotecnológica. **Scientia Amazonia**, v. 7, n. 2, p. 15-23, 2018. Acesso em: 17 jul. 2023.
- AYYAR, S.; APPAVOO, S.; BASKER, M.; PANDIYARAJAN, P.; KAVIMANI, R. Effect of Zinc and Microbial Inoculation on Soil Enzyme Activities for Maize (*Zea mays* L.) in Black Soil. **International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences**, v. 8, n. 08, p. 1804-1814, 2019. Acesso em: 27 nov. 2023.
- AZZIZ, G.; BAJSA, N.; HAGHJOU, T.; TAULÉ, C.; VALVERDE, Á.; IGUAL, J. M.; ARIAS, A. Abundance, diversity and prospecting of culturable phosphate solubilizing bacteria on soils under crop-pasture rotations in a no-tillage regime in Uruguay. **Applied Soil Ecology**, v.61, p.320-326, 2012. Acesso em: 22 jun. 2023.
- BASNET, Pawan; DHITAL, Rajiv; RAKSHIT, Amitava. Biopesticides: a genetics, genomics, and molecular biology perspective. **Biopesticides**, p. 107-116, 2022. Acesso em: 13 set. 2023.
- BASTOS, A. L., DA COSTA, J. P., SILVA, I. D. F. D., RAPOSO, R. W., OLIVEIRA, F. D. A., & ALBUQUERQUE, A. W. D. Resposta do milho a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1291-1296, 2010. Acesso em: 07 set. 2023.
- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; GALLO, J.R. **Métodos de análises química de plantas**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. Não paginado, (Instituto Agronômico, Boletim 78). Acesso em: 13 set. 2023.
- BATISTA, F. D. C., FERNANDES, T. A., ABREU, C. S., OLIVEIRA, M. C., RIBEIRO, V. P., GOMES, E. A. & OLIVEIRA-PAIVA, C. A. **Potencial de Microrganismos Rizosféricos e Endofíticos de Milho em Solubilizar o Fosfato de Ferro e Produzir Sideróforos**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento n. 166, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas/MG, 2018. Acesso em: 25 set. 2023.
- BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN. N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen–Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v.1, p.1-12, 2018. Acesso em: 01 dez. 2023.

BHARTI, N., BARNAWAL, D., AWASTHI, A., YADAV, A., & KALRA, A.. Plant growth promoting rhizobacteria alleviate salinity induced negative effects on growth, oil content and physiological status in *Mentha arvensis*. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, p. 45-60, 2014. Acesso em: 17 jan. 2024.

BHATTACHARYYA, P. N.; JHA, D. K. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 28, p. 1327-1350, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>. Acesso em: 18 set. 2023.

Billah, M., Khan, M., Bano, A., Hassan, T. U., Munir, A., & Gurmani, A. R. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: **Keys for sustainable agriculture**. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, n. 10, p. 904-916, 2019. Acesso em: 18 set. 2023.

BRASIL. **Ministério da Agricultura**. Regras para análise de sementes. Brasília, 1992. 365 p. Acesso em: 30 nov. 2023.

BREVILIERI, R. C. **Adubação fosfatada na cultura da soja em Latossolo Vermelho cultivado há 16 anos sob diferentes sistemas de manejo**. Dissertação. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - Aquidauana . 52p. 2013. Acesso em: 26 ago. 2023.

BRITO, L. E. M., DA MATA REZENDE, A. L. A., DA SILVA, C. O. C., DA SILVA, H. D., DA SILVA, C. D. R., & DA LUZ, J. H. S. Desenvolvimento e nutrição inicial do milho com inoculação do biomaphos® associado a fontes fosfatadas. **Agri-environmental sciences**, v. 8, n. 2, p. 12-12, 2022. Acesso em: 26 ago. 2023.

BUTTERLY, C. R., BÜNEMANN, E. K., MCNEILL, A. M., BALDOCK, J. A., & MARSCHNER, P. (Carbon pulses but not phosphorus pulses are related to decreases in microbial biomass during repeated drying and rewetting of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 7, p. 1406-1416, 2009. Acesso em: 21 set. 2023.

CAMARGO, M. S.; BARBOSA, D. S.; RESENDE, R. H.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Fósforo em solos de Cerrado submetidos à calagem. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 187-194, 2010. Acesso em: 01 ago. 2023.

CAMPOS, Mari Lucia *et al.* **BT 65-Ciclagem de nutrientes em floretas e pastagens**. 2021. Acesso em: 11 dez. 2022.

CASALI, C. A.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. D.; CALEGARI, A.; PICCIN, R. **Benefícios do uso de plantas de cobertura de solo na ciclagem de fósforo**. In: **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando à conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 23-33. Acesso em: 26 ago. 2023.

CASTRO, L. R.; REIS, T. C.; JÚNIOR, O. F.; ALMEIDA, R. B. S.; ALVES, D. S. Doses e formas de aplicação de fósforo na cultura do milho. **Revista Agrarian**. v.9, n.31, p.47 - 54, Dourados, 2016. Acesso em: 09 jul. 2023.

COELHO, A.M.; PITTA, G.L.E; ALVES, V.M.C.; FRANÇA, G.E. DE; HERNANI, L.C. **Cultivo do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. Acesso em: 09 jul. 2023.

COELHO, M. J. A., DIAZ, D. R., HETTIARACHCHI, G. M., HANSEL, F. D., & PAVINATO, P. S. Soil phosphorus fractions and legacy in a corn-soybean rotation on Mollisols in Kansas, USA. **Geoderma Regional**, 18, e00228, 2019b. Acesso em: 09 dez. 2023.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 7 - Safra 2019/2020, n. 4 – Quarto levantamento, Brasília, p.1-58, 2020. Acesso em: 25 nov. 2023.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: v. 7 - Safra 2020/2021, n. 4 – Quarto levantamento, Brasília, p.1-57, 2021. Acesso em: 25 nov. 2023.

DEITH, L. G.; ANDERSON, S. A.; HOFFMANN, B. W. Soil and fertilizer sources of plant nutrients. **Management of Wisconsin Soils A**, v. 3588, p. 87, 2005. Acesso em: 25 mai. 2023.

ELHAISSOUFI, W., KHOURCHI, S., IBNYASSER, A., GHOULAM, C., RCHIAD, Z., ZEROUAL, Y., BARGAZ, A. Phosphate solubilizing rhizobacteria could have a stronger influence on wheat root traits and aboveground physiology than rhizosphere P solubilization. **Frontiers in plant science**, v.11, p.979, 2022. Acesso em: 03 nov. 2023.

FERREIRA, T. C., LAGO, L. D., SILVA, L. G., PACIFICO, M. G., FARIA, M. R. D., & BETTIOL, W. Potential of *Bacillus* spp. for growth promotion and *Fusarium verticillioides* control in corn. **Summa Phytopathologica**, v. 47, p. 195-203, 2022.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo às plantas**. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. Acesso em: 06 nov. 2023.

GORDON, R. E. One hundred and seven years of the genus *Bacillus*. RC Berkeley, and M. Goodfellow (ed.) **The aerobic endosporeforming bacteria**. 1981. Acesso em: 06 nov. 2023.

GOUDA, S., KERRY, R. G., DAS, G., PARAMITHIOTIS, S., SHIN, H. S., & PATRA, J. K. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. **Microbiological research**, v. 206, p. 131-140, 2018. Acesso em: 29 jul. 2023.

GUIMARÃES, P. T. G. Adubação do cafeeiro e a qualidade do produto colhido. **Informe Agropecuário**. 32(261):39-51, 2011. Acesso em: 06 jun. 2023.

GUPTA, G.; PARIHAR, S. S.; AHIRWAR, N. K.; SNEHI, S. K.; SINGH, V. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. **Journal of Microbial and Biochemical Technology**, v. 7, n. 2, p. 96-102, 2015. Acesso em: 17 set. 2023.

HALLAMA, M.; PEKRUN, C.; LAMBERS, H.; KANDELER, E. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, [S.L.], v. 434, n. 1-2, p. 7-45, Oct. 2018. Acesso em: 15 dez. 2023.

HANSEL, F. D., AMADO, T. J. C., BORTOLOTTTO, R. P., TRINDADE, B. S., & HANSEL, D. S. S. Influence of different phosphorus sources on fertilization efficiency. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 7, n. 1, p. 103-111, 2014. Acesso em: 06 jan. 2024.

HANSEL, F. D.; RUIZ DIAZ, D. A.; AMADO, T. J.; ROSSO, L. H. Deep banding increases phosphorus removal by soybean grown under no-tillage production systems. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 1091-1098, 2013. Acesso em: 06 nov. 2023.

HE, H., PENG, Q., WANG, X., FAN, C., PANG, J., LAMBERS, H., & ZHANG, X. Growth, morphological and physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa*) to phosphorus supply in two alkaline soils. **Plant and Soil**, v. 416, p. 565-584, 2017. Acesso em: 16 mai. 2023.

HERNÁNDEZ, I.; MUNNÉ-BOSCH, S. Linking phosphorus availability with photooxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany, Oxford**, v. 66, n. 10, p. 2889-2900, 2015. Acesso em: 04 ago. 2023.

HSU, P. C. L., CONDRON, L., O'CALLAGHAN, M., & HURST, M. R. HemX is required for production of 2-ketogluconate, the predominant organic anion required for inorganic phosphate solubilization by *Burkholderia* sp. HA185. **Environmental Microbiology Reports**, v. 7, p. 918–928, 2015. Acesso em: 11 dez. 2023.

HUU, T. N.; GIAU, T. T.N.; NGAN, P. N.; VAN, T.T. Bich; KHUONG, N. Q.. Potential of Phosphorus Solubilizing Purple Nonsulfur Bacteria Isolated from Acid Sulfate Soil in Improving Soil Property, Nutrient Uptake, and Yield of Pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill) under Acidic Stress. **Applied And Environmental Soil Science**, [S.L.], v. 2022, p. 1-13, 26 nov. 2022. Acesso em: 26 nov. 2023.

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in agronomy**, v. 34, p. 197-224, 1981. Acesso em: 28 jul. 2023.

KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, p.1-7, 2019. Acesso em: 07 mai. 2023.

KAUR, G.; REDDY, M.S. Phosphate solubilizing rhizobacteria from an organic farm and their influence on the growth and yield of maize (*Zea mays* L.). **The Journal of General and Applied Microbiology**, v.59, n.4, p.295-303, 2013. Acesso em: 21 jun. 2023.

KAYOUMU, M.; IQBAL, A.; MUHAMMAD, N.; LI, X.; LI, L.; WANG, X.; GUI, H.; QI, Q.; RUAN, S.; GUO, R. Phosphorus Availability Affects the Photosynthesis and Antioxidant System of Contrasting Low-P-Tolerant Cotton Genotypes. **Antioxidants**, v.12, n.2, p.466, 2023. Acesso em: 28 jul. 2023.



KETTERINGS, Q.; CZYMMEK, K. Remoção de Fósforo por Culturas de Campo. Em **Agronomy Fact Sheet Series**; Ficha Técnica nº 28. Disponível em: <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet28.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2022.

KIPROTICH, K., Muoma, J., Omayio, D. O., Ndombi, T. S., & Wekesa, C. Molecular characterization and mineralizing potential of phosphorus solubilizing bacteria colonizing common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizosphere in Western Kenya. **International Journal of Microbiology**, v. 2023, 2023. Acesso em: 01 dez. 2023.

KLAMER, F., VOGEL, F., LI, X., BREMER, H., NEUMANN, G., NEUHÄUSER, B., LUDEWIG, U. Estimating the importance of maize root hairs in low phosphorus conditions and under drought. **Annals of botany**, v. 124, n. 6, p. 961-968, 2019. Acesso em: 21 jan. 2024.

KUAN, K. B., OTHMAN, R., ABDUL RAHIM, K., & SHAMSUDDIN, Z. H. Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions. **PloS one**, v. 11, n. 3, p. e0152478, 2016. Acesso em: 22 dez. 2023.

LAIR, G. J., ZEHETNER, F., KHAN, Z. H., & GERZABEK, M. H. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. **Geoderma**, v. 149, n. 1-2, p. 39-44, 2009. Acesso em: 03 dez. 2023.

LEGGETT, M., NEWLANDS, N. K., GREENSHIELDS, D., WEST, L., INMAN, S., & KOIVUNEN, M. E. Maize yield response to a phosphorus-solubilizing microbial inoculant in field trials. **The Journal of agricultural science**, v. 153, n. 8, p. 1464-1478, 2015. Acesso em: 01 dez. 2023.

LEMOES, V. T. **Ácido cítrico via solo e seus efeitos na nutrição do cafeeiro**. 2015. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015. Acesso em: 19 mai. 2023.

LI, N., SHENG, K., ZHENG, Q., HU, D., ZHANG, L., WANG, J., & ZHANG, W. Inoculation with phosphate-solubilizing bacteria alters microbial community and activates soil phosphorus supply to promote maize growth. **Land Degradation & Development**, v. 34, n. 3, p. 777-788, dez. 2022. Acesso em: 11 nov. 2023.

LIANG, Xinqiang; JIN, Yi; HE, Miaomiao; LIU, Yu; HUA, Guifen; WANG, Sheng; TIAN, Guangming. Composition of phosphorus species and phosphatase activities in a paddy soil treated with manure at varying rates. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 237, p. 173-180, jan. 2017. Acesso em: 01 dez. 2023.

LIN, T.F.; HUANG, H.I.; SHEN, F.T.; YOUNG, C.C. The protons of gluconic acid are the major factor responsible for the dissolution of tricalcium phosphate by *Burkholderia cepacia* CC-A174. **Bioresource technology**, v.97, p.957-960, 2005. Acesso em: 01 jan. 2024.

LIU, Y., HOSSEINI BAI, S., WANG, J., HU, D., WU, R., ZHANG, W., & ZHANG, M. Strain Klebsiella ZP-2 inoculation activating soil nutrient supply and altering soil phosphorus cycling. **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 8, p. 2146-2157, 2022. Acesso em: 15 jul. 2023.

LOGAN, N.A. AND DE VOS, P. (2009) Genus I. Bacillus Cohn 1872, 174AL. In: De Vos, P., Garrity, G.M., Jones, D., Krieg, N.R., Ludwig, W., Rainey, F.A., Schleifer, K.H. and Whitman, W.B., Eds., **Bergey's Manual of Systematic Bacteriology**, 2nd Edition, Springer, New York, v.3, p.21-128, 2009. Acesso em: 03 ago. 2023.

LUCERO, C.T.; LORDA, G.S.; ANZUAY, M.S.; LUDUEÑA, L.M.; TAURIAN, T. Peanut endophytic phosphate solubilizing bacteria increase growth and P content of soybean and maize plants. **Current Microbiology**, v.78, p.1961-1972, 2021. Acesso em: 22 jan. 2024.

MALAVOLTA, E. **Funções dos macros e micronutrientes. in: Manual de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Ceres, 2006. p. 126-402. Acesso em: 18 nov. 2023.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola. 3. ed.** São Paulo: Agronômica Ceres, 319p. 1981. Acesso em: 07 fev. 2023.

MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZUYAKOV, Y. Effects of flooding on phosphorus and iron mobilization in highly weathered soils under different land-use types: Short-term effects and mechanisms. **Catena**, v. 158, p. 161-170, 2017. Acesso em: 11 mar. 2023.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants. 3. ed.** London: Academic Press, 2012. Acesso em: 29 out. 2023.

MARTINEZ, H.E.P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa. 2. ed.** Viçosa: Imprensa Universitária, 1999. 47 p. (Cadernos Didáticos 1). Acesso em: 05 jan. 2024.

MARTINEZ, H.E.P.; CARVALHO, J.G.; SOUZA, R.B. **Diagnose foliar. In Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais: 5ª.** Aproximação; RIBEIRO, A.C., GUIMARÃES, P.T.G., ALVAREZ, V.V.H., Eds.; Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, Brazil, 1999; pp. 143–168. Acesso em: 19 fev. 2023.

MEYER, J. B., FRAPOLLI, M., KEEL, C., & MAURHOFER, M. Pyrroloquinoline quinone biosynthesis gene pqqC, a novel molecular marker for studying the phylogeny and diversity of phosphate-solubilizing pseudomonads. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 77, n. 20, p.7345-7354, 2011. Acesso em: 28 jun. 2023.

MIRANDA, R. A., DUARTE, J. D. O., GARCIA, J., & DURAES, F. **Sustentabilidade da cadeia produtiva do milho.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. Acesso em: 14 abr. 2023.

MOREIRA, JAA. **Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. Acesso em: 01 dez. 2023.

MOTOMIYA, W. R.; FABRÍCIO, A. C.; MARCHETTI, M. E. **Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.4, p.307-312, abr. 2004. Acesso em: 20 jan. 2024.

NAIK, P. R., RAMAN, G., NARAYANAN, K. B., & SAKTHIVEL, N. Assessment of genetic and functional diversity of phosphate solubilizing fluorescent pseudomonads isolated from rhizospheric soil. **BMC Microbiology**, v. 8, n. 1, p. 230, 2008. Acesso em: 09 ago. 2023.

NEUFELDT, H.; DA SILVA, J. E.; AYARZA, M. A.; ZECH, W. Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 31, n. 1, p. 30-37, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740050620>. Acesso em: 27 jan. 2023

NICCHIO, Bruno. **Agricultural efficacy of alternative phosphorus sources**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI: 10.14393/ufu.di.2015.35. Acesso em: 17 de março de 2023.

NIEDERBERGER, J.; KOHLER, M.; BAUHUS, J. **Distribution of phosphorus fractions with different plant availability in German forest soils and their relationship with common soil properties and foliar P contents**. Soil, v. 5, n. 2, p. 189-204, 2019. Acesso em: 22 de janeiro de 2023.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p. Acesso em: 03 de setembro de 2023.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. **Viçosa: SBCS**, 2007. p. 471-550. Acesso em: 14 de novembro de 2023.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A., COTA, L. V., MARRIEL, I. E., GOMES, E. A., DE SOUSA, S. M., LANA, U. D. P. & 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**. 2020. Acesso em: 28 de julho de 2023.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A., MARRIEL, I. E., GOMES, E. A., COTA, L. V., DOS SANTOS, F. C., DE SOUSA, S. M., & 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, **Circular Técnica, n. 260**, p. 18, 2020b. Acesso em: 09 de dezembro de 2023.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A., MARRIEL, I., GOMES, E., LANA, U. D. P., SCOTTI, M., & ALVES, V. Diversidade bacteriana da rizosfera de genótipos de milho contrastantes na eficiência de uso de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 44, n. 11, p. 1473-1482, 2009. Acesso em: 05 de fevereiro de 2024.

OTEINO, N., LALLY, R. D., KIWANUKA, S., LLOYD, A., RYAN, D., GERMAINE, K. J., & DOWLING, D. N. Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic

*Pseudomonas* isolates. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, p. 745, 2015. Acesso em: 11 de outubro de 2023.

OWEN, D., WILLIAMS, A. P., GRIFFITH, G. W., & WITHERS, P. J. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 41-54, 2015. Acesso em: 19 de março de 2023.

PAVINATO, P. S., CHERUBIN, M. R., SOLTANGHEISI, A., ROCHA, G. C., CHADWICK, D. R., & JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020. Acesso em: 30 de agosto de 2023.

PROCHNOW, L. I., RESENDE, Á. V., JUNIOR, A. D. O., FRANCISCO, E. A. B., CASARIN, V., & PAVINATO, P. S. **Localização do fósforo em culturas anuais na agricultura nacional: Situação importante, complexa e polêmica**. Informações Agronômicas, 158(19), 1-5. 2017. Acesso em: 05 de janeiro de 2024.

RADHAKRISHNAN, Ramalingam; HASHEM, Abeer; ABD\_ALLAH, Elsayed F. Bacillus: A biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. **Frontiers in physiology**, v. 8, p. 667, 2017. Acesso em: 18 de fevereiro de 2023.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 285p. 2001. Acesso em: 07 de junho de 2023.

RAMAKRISHNA, Wusirika; YADAV, Radheshyam; LI, Kefeng. Plant growth promoting bacteria in agriculture: Two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 10-18, 2019. Acesso em: 23 de abril de 2023.

REDEL, Y., STAUNTON, S., DURÁN, P., GIANFREDA, L., RUMPEL, C., & DE LA LUZ MORA, M. Fertilizer P uptake determined by soil P fractionation and phosphatase activity. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 19, p. 166-174, 2019. Acesso em: 14 de setembro de 2023.

RESENDE, Á. V. de; FURTINI NETO, A. E. **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 32 p. 2007. Acesso em: 15 mar. 2023.

RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KIMPORA, D.I.; SANTOS, J.Z.L. & CARNEIRO, L.F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:453-466, 2006. Acesso em: 28 abr. 2023.

REZAKHANI, Leila; MOTESHAREZADEH, Babak; TEHRANI, Mohammad Mehdi; ETESAMI, Hassan; HOSSEINI, Hossein Mirseyed. Phosphate-solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus (P) uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) plant fertilized with soluble or insoluble P source. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, [S.L.], v. 173, p. 504-513, maio 2019. Acesso em: 10 jan. 2023.

RIBEIRO, V. P.; MARRIEL, I. E.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G. P.; MATTOS, B. B.; OLIVEIRA, C. A.; GOMES, E. A. Endophytic *Bacillus* strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, p. 40-46, 2018. Acesso em: 03 fev. 2023.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J.. Soil Microorganisms Mediating Phosphorus Availability Update on Microbial Phosphorus. **Plant Physiology**, [S.L.], v. 156, n. 3, p. 989-996, 23 maio 2011. Acesso em: 20 dez. 2023.

RICHARDSON, Alan E.; SIMPSON, Richard J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. **Plant physiology**, v. 156, n. 3, p. 989-996, 2011. Acesso em: 12 jan. 2024.

SAMARAS, A., KAMOU, N., TZELEPIS, G., KARAMANOLI, K., MENKISSOGLU-SPIROUDI, U., & KARAOGLANIDIS, G. S. Root transcriptional and metabolic dynamics induced by the Plant Growth Promoting Rhizobacterium (PGPR) *Bacillus subtilis* Mbi600 on cucumber plants. **Plants**, v. 11, n. 9, p. 1218, 2022. Acesso em: 08 abr. 2023.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C. ; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008. Acesso em: 05 mar. 2023.

SCHNEIDER, K. D., THIESSEN MARTENS, J. R., ZVOMUYA, F., REID, D. K., FRASER, T. D., LYNCH, D. H. & WILSON, H. F. Options for improved phosphorus cycling and use in agriculture at the field and regional scales. **J Environ Quality**, v. 48, n. 5, p. 1247-1264, 2019. Acesso em: 19 jan. 2024.

SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, 2, p. 1-14, 2013. Acesso em: 30 jan. 2023.

SHIN, H., SHIN, H. S., DEWBRE, G. R., & HARRISON, M. J. Phosphate transport in *Arabidopsis*: Pht1;1 and Pht1;4 play a major role in phosphate acquisition from both low- and high-phosphate environments. **Plant Journal**, 2004. Acesso em: 12 jul. 2023.

SONG, J., MIN, L., WU, J., HE, Q., CHEN, F., & WANG, Y.. Response of the microbial community to phosphate-solubilizing bacterial inoculants on *Ulmus chinensis* in Eastern China. **Plos one**, v. 16, n. 2, e0247309, 2021. Acesso em: 23 nov. 2023.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: Simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira. São Pedro. Anais. **Piracicaba: Potafos**, p. 157-200. 2004. Acesso em: 08 ago. 2023.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 147-168, 2004. Acesso em: 17 abr. 2023.

SOUSA, S. M., DE OLIVEIRA, C. A., ANDRADE, D. L., DE CARVALHO, C. G., RIBEIRO, V. P., PASTINA, M. M. & GOMES, E. A Tropical Bacillus strains inoculation enhances maize root surface area, Dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 867-877, 2021. Acesso em: 05 fev. 2023.

STAUFFER, M.D.; SULEWSKI, G. Fósforo: Essencial para a vida. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (ed.) **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 1-12. Acesso em: 30 set. 2023.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MØLLER, I. M., & MURPHY, A. **Fisiologia vegetal. 6. ed.** Porto Alegre: Artmed, 2017. Acesso em: 19 jan. 2024.

TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, UFRGS, Faculdade de Agronomia, 188 p., **Boletim técnico de solos n.º 5, 1985**. Acesso em: 03 mar. 2023.

TIMOFEEVA, A.; GALYAMOVA, M.; SEDYKH, S. Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture. **Plants**, v. 11, n. 16, p. 2119, 15 ago. 2022. Acesso em: 21 jun. 2023.

TSOTETSI, T., NEPHALI, L., MALEBE, M., & TUGIZIMANA, F. Bacillus for plant growth promotion and stress resilience: What have we learned?. **Plants**, v. 11, n. 19, p. 2482, 2022. Acesso em: 14 out. 2023.

U.S. Department of Agriculture (USDA). Agriculture research service. USDA National **Nutrient Database for Standard Reference**, Release 28. 2022. Acesso em: 02 fev. 2023.

VANCE, C. P., UHDE-STONE, C., & ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, n. 3, p. 423-447, mar. 2003. Acesso em: 07 mai. 2023.

WANG, H. Y., Shen, L. I. U., Zhai, L. M., Zhang, J. Z., Ren, T. Z., Fan, B. Q., & LIU, H. B. Preparation and utilization of phosphate biofertilizers using agricultural waste. **Journal of Integrative Agriculture**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 158-167, 2015. Acesso em: 11 ago. 2023.

WANG, L., & LIANG, T. Effects of exogenous rare earth elements on phosphorus adsorption and desorption in different types of soils. **Chemosphere**, [S.l.], v. 103, p. 148-155, 2014. Acesso em: 25 out. 2023.

WANI, P., KHAN, M., & ZAIDI, A. Co-inoculation of nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria to promote growth, yield and nutrient uptake in chickpea. **Acta Agronomica Hungarica**, [S.l.], v. 55, n. 3, p. 315-323, 2007. Acesso em: 09 mar. 2023.

YOU, M., FANG, S., MACDONALD, J., XU, J., & YUAN, Z. C. (2020). Isolation and characterization of Burkholderia cenocepacia CR318, a phosphate solubilizing bacterium promoting corn growth. **Microbiological Research**, 233, 126395. Acesso em: 20 jul. 2023.

ZAMARIOLLI, L. E. R., BÜLL, L. T., PINOTTI, É. B., & BUENO, C. E. M. D. S. Efeito da inoculação com pseudomonas via semente na cultura do milho. **Revista Científica Eletrônicas de Xx da Faef**, v. 36, n. 2, p. 1-11, 2019. Acesso em: 18 mar. 2023.

ZHANG, Y., CHEN, F. S., WU, X. Q., LUAN, F. G., ZHANG, L. P., FANG, X. M., ... & YE, J. R. (2018). Isolation and characterization of two phosphate-solubilizing fungi from rhizosphere soil of moso bamboo and their functional capacities when exposed to different phosphorus sources and pH environments. **PloS one**, 13(7), e0199625. Acesso em: 05 set. 2023.

ZHAO, K., PENTTINEN, P., ZHANG, X., AO, X., LIU, M., YU, X., & CHEN, Q. (2014). Maize rhizosphere in Sichuan, China, hosts plant growth promoting Burkholderia cepacia with phosphate solubilizing and antifungal abilities. **Microbiological Research**, 169(1), 76-82. Acesso em: 22 jan. 2024.

ZHENG, B. X., IBRAHIM, M., ZHANG, D. P., BI, Q. F., LI, H. Z., ZHOU, G. W. & YANG, X. R. Identification and characterization of inorganic-phosphate-solubilizing bacteria from agricultural fields with a rapid isolation method. **AMB Express**, v. 8, n. 1, p. 47, 2018. Acesso em: 14 jun. 2023.

ZHIHUI, W. E. N., JIANBO, S. H. E. N., BLACKWELL, M., HAIGANG, L. I., BINGQIANG, Z. H. A. O., & Huimin, Y. U. A. N. Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment. **Pedosphere**, v. 26, n. 1, p. 62-73, 2016.. Acesso em: 28 jul. 2023.

ZHOU, Y., ZHU, H., FU, S., & YAO, Q. Variation in soil microbial community structure associated with different legume species is greater than that associated with different grass species. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 1007, 2018. Acesso em: 10 abr. 2023.

ZUCARELI, C., BARZAN, R. R., SILVA, J. B. D., & CHAVES, D. P.. Associação de fosfatos e inoculação com *Bacillus subtilis* e seu efeito no crescimento e desempenho produtivo do feijoeiro. **Revista Ceres**, v. 65, p. 189-195, 2018. Acesso em: 09 fev. 2024.