



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
PRODUÇÃO VEGETAL E BIOPROCESSOS ASSOCIADOS**

**DESENVOLVIMENTO INICIAL DE PLANTAS DE MILHO EM SOLO  
FERTILIZADO COM FOSFATOS E BIOFERTILIZANTE LÍQUIDO**

**GABRIEL AUGUSTO SGOBI FERREIRA CARAPEBA**

**Araras  
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
PRODUÇÃO VEGETAL E BIOPROCESSOS ASSOCIADOS**

**DESENVOLVIMENTO INICIAL DE PLANTAS DE MILHO EM SOLO  
FERTILIZADO COM FOSFATOS E BIOFERTILIZANTE LÍQUIDO**

**GABRIEL AUGUSTO SGOBI FERREIRA CARAPEBA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. EDUARDO DAL'AVA MARIANO**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Produção  
Vegetal e Bioprocessos Associados  
como requisito parcial à obtenção do  
título de MESTRE EM PRODUÇÃO  
VEGETAL E BIOPROCESSOS  
ASSOCIADOS

Araras

2025

Carapeba, Gabriel Augusto Sgobi Ferreira

Desenvolvimento inicial de plantas de milho em solo fertilizado com fosfatos e biofertilizante líquido / Gabriel Augusto Sgobi Ferreira Carapeba -- 2025. 56f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras  
Orientador (a): Eduardo Dal'Ava Mariano  
Banca Examinadora: Rodrigo Gazaffi, Júlio César Bertoni  
Bibliografia

1. Eficiência de uso de fósforo. 2. Biofertilizantes líquidos. 3. Desenvolvimento inicial do milho. I. Carapeba, Gabriel Augusto Sgobi Ferreira. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8 7083



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Agrárias

Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gabriel Augusto Sgobi Ferreira Carapeba, realizada em 14/08/2025.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Eduardo Dal Ava Mariano (UFSCar)

Prof. Dr. Rodrigo Gazaffi (UFSCar)

Prof. Dr. Julio Cesar Bertoni (BiomCrop)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me conceder forças, perseverança e saúde para seguir em frente, e por permitir que eu alcançasse todos os objetivos que almejei. Sua presença em minha vida tem sido a base que sustenta cada conquista.

À minha família, meu mais profundo agradecimento por estar ao meu lado em todos os momentos. O apoio incondicional, as palavras de incentivo e a compreensão durante os desafios enfrentados foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Esta conquista é, em grande parte, fruto do amor e da dedicação de cada um de vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Dal’Ava Mariano, expresso minha imensa gratidão pela orientação, paciência e incentivo ao longo desta jornada acadêmica. Seu conhecimento, dedicação e exemplo de excelência profissional foram fundamentais para a realização deste trabalho e continuarão a inspirar minha trajetória.

À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados, meu reconhecimento pelo suporte acadêmico e pela estrutura que proporcionaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos órgãos de fomento, em especial à CAPES, pelo apoio financeiro que viabilizou a execução deste estudo e contribuiu significativamente para o meu crescimento científico e profissional.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a concretização deste trabalho, meu sincero e eterno obrigado!

## SUMÁRIO

	Página
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	ii
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	07
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	08
3.1 Fontes, disponibilidade no solo e estratégias para melhorar o uso de P na agricultura .....	08
3.2 Efeitos do biofertilizante na nutrição de plantas e sustentabilidade agrícola .....	09
3.3 Dinâmica dos biofertilizantes no solo e a interação planta-microrganismo .....	11
3.4 Efeitos dos biofertilizantes na morfologia e fisiologia da planta .....	14
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	17
4.1 Coleta e preparo do material de solo usado no experimento .....	17
4.2 Características do biofertilizante utilizado no experimento .....	18
4.3 Características dos fosfatos utilizados no experimento .....	20
4.4 Determinação das doses de fósforo e do biofertilizante líquido .....	22
4.5 Montagem e condução do experimento .....	23
4.6 Delineamento e tratamentos experimentais e variáveis avaliadas .....	25
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	43
<b>7 LITERATURA CITADA</b> .....	44

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Atributos químicos e físicos do material de solo utilizado no experimento ....	18
Tabela 2. Distribuição de cepas bacterianas no biofertilizante por função.....	20
Tabela 3. Características químicas e físicas do biofertilizante.....	20
Tabela 4. Teor de P total, solúvel em ácido cítrico, solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) + água, e total nominal dos fosfatos usados no estudo .....	21
Tabela 5. Contrastes ortogonais entre fontes de P para variáveis do desenvolvimento inicial de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	28
Tabela 6. Resumo da análise de variância com P-valor para as fontes de variação nas variáveis altura de planta (AP) nas diferentes medições ao longo do cultivo e matéria de parte aérea seca (MPAS) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	29
Tabela 7. Estimativas e significância estatística (P-valor) dos contrastes entre fontes de P para altura de planta aos 32 dias após emergência (AP_32DAE) e matéria de parte aérea seca (MPAS) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	31
Tabela 8. Índice de Eficiência Agronômica (IEA) das fontes de P estudadas considerando a altura de planta (AP) e a matéria de parte aérea seca (MPAS) aos 32 dias após emergência das plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	32
Tabela 9. Resumo da análise de variância com P-valor para as fontes de variação nas variáveis Índice de Clorofila Falker para clorofila a (TCa) e para clorofila b (TCb) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante.....	34
Tabela 10. Resumo da análise de variância com P-valor para as fontes de variação nas variáveis Condutância Estomática (CE), Transpiração Aparente (TA), Eficiência Quântica do Fotossistema II (EQFII), Taxa de Transporte de Elétrons (TTE) e Diferença de temperatura entre a folha e o ar (DTF) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	36
Tabela 11. Matriz de correlação de Pearson para variáveis fisiológicas e bioquímicas em plantas aos 18 e 32 DAE .....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação esquemática dos principais fatores fisiológicos envolvidos na aquisição e mobilização de P pelas raízes das plantas e microrganismos da rizosfera .....	12
Figura 2. Mecanismos de solubilização de fosfatos por microrganismos .....	13
Figura 3. Variação da acidez ativa (pH) do Latossolo Vermelho como resultado da aplicação de carbonato de cálcio (CaCO <sub>3</sub> ) .....	19
Figura 4. Abundância relativa (%) dos principais gêneros de bactérias identificadas no biofertilizante .....	19
Figura 5. Produção de biomassa de parte aérea por plantas de milho em resposta às doses de P aplicadas ao solo como monofosfato de cálcio e uso de biofertilizante ....	22
Figura 6. Aplicação de biofertilizante no solo, localizada no furo de semeadura (à esquerda) e espalhada na superfície do solo, em cobertura (à direita) .....	24
Figura 7. Distribuição dos vasos em duas bancadas em casa de vegetação .....	25
Figura 8. Medição da altura de planta com régua graduada .....	26
Figura 9. Medição do teor de clorofila a e b e das variáveis da fotossíntese .....	27
Figura 10. Altura de planta (AP) em diferentes dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	30
Figura 11. Massa da parte aérea seca (MPAS) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	30
Figura 12. Índice de Clorofila Falker para clorofila a (TCa) e b (TCb) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	34
Figura 13. Condutância Estomática (CE) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	37
Figura 14. Eficiência Quântica do Fotossistema II (EQFII) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	37
Figura 15. Diferença entre a Temperatura da Folha da planta e do ar (DTF) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	37
Figura 16. Transpiração Aparente (TA) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	38
Figura 17. Taxa de Transporte de Elétrons (TTE) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido .....	38
Figura 18. Mapa de Calor com Dendrograma da Correlação de Pearson para variáveis fisiológicas e bioquímicas em plantas aos 18 e 32 DAE .....	41

## **DESENVOLVIMENTO INICIAL DE PLANTAS DE MILHO EM SOLO FERTILIZADO COM FOSFATOS E BIOFERTILIZANTE LÍQUIDO**

**Autor: GABRIEL AUGUSTO SGOBI FERREIRA CARAPEBA**

**Orientador: Prof. Dr. EDUARDO DAL'AVA MARIANO**

### **RESUMO**

A demanda por fertilizantes fosfatados e o esgotamento de suas fontes minerais não renováveis representam desafios cruciais para a sustentabilidade agrícola. O fósforo (P) é vital para o desenvolvimento vegetal, e biofertilizantes, contendo microrganismos solubilizadores, surgem como alternativa promissora para otimizar a disponibilidade de P no solo e reduzir a dependência de insumos minerais. Este estudo avaliou a influência de diferentes fontes de P e um biofertilizante líquido em variáveis de crescimento e fisiologia do milho em casa de vegetação. Foram analisadas a altura da planta, matéria da parte aérea seca, teor de clorofila e indicadores fisiológicos como condutância estomática, transpiração, eficiência quântica do fotossistema II, taxa de transporte de elétrons e diferença de temperatura foliar. Os resultados mostraram que fosfatos de maior solubilidade, como o Superfosfato Triplo (SFT) e a Mistura de Fosfatos (MFS), promoveram ganhos significativos no crescimento inicial e acúmulo de biomassa do milho. Em contraste, o biofertilizante teve impacto positivo limitado à altura da planta no estágio inicial (12 dias após a emergência), não apresentando efeitos significativos nas demais variáveis ou fases de desenvolvimento, nem sinergia com os fosfatos naturais (GAFSA e FNN). Conclui-se que o uso de fontes de P solúveis é preponderante para o vigor inicial da cultura. A eficácia do biofertilizante testado parece depender das condições de aplicação e estágio da planta, sugerindo a necessidade de investigações futuras sobre doses e estratégias de aplicação para otimizar seu potencial.

**Palavras-chave:** fósforo; fertilizantes; fosfatados; microrganismos; milho; eficiência

## **INITIAL DEVELOPMENT OF MAIZE PLANTS IN SOIL FERTILIZED WITH FOSFATES AND LIQUID BIOFERTILIZER**

**Author: GABRIEL AUGUSTO SGOBI FERREIRA CARAPEBA**

**Adviser: Prof. Dr. EDUARDO DAL'AVA MARIANO**

### **ABSTRACT**

The growing demand for phosphate fertilizers and the depletion of their non-renewable mineral sources pose crucial challenges to agricultural sustainability. Phosphorus (P) is vital for plant development, and biofertilizers containing P-solubilizing microorganisms are a promising alternative to optimize P availability in the soil and reduce dependence on mineral inputs. This study evaluated the influence of different P sources and a liquid biofertilizer on the growth and physiological parameters of corn (*Zea mays*) in a greenhouse. We analyzed plant height, shoot dry matter, chlorophyll content, and physiological indicators, including stomatal conductance, transpiration, photosystem II quantum efficiency, electron transport rate, and leaf temperature. The results showed that phosphates with higher solubility, such as Triple Superphosphate (TSP) and a Phosphate Mixture (PM), significantly promoted initial growth and biomass accumulation. In contrast, the biofertilizer had only a limited positive impact on plant height at the initial stage (12 days after emergence) and showed no significant effects on other variables or later development stages, nor did it exhibit synergy with natural rock phosphates (GAFSA and FNN). We conclude that soluble P sources are critical for establishing initial crop vigor. The effectiveness of the tested biofertilizer seems dependent on application conditions and plant stage, highlighting the need for future research on optimal doses and application strategies to unlock its full potential.

**Keywords:** phosphorus; fertilizers; phosphates; microorganisms; corn; efficiency

## INTRODUÇÃO

Projeta-se que a população mundial alcance 9,4 bilhões de habitantes até 2050. Para satisfazer as crescentes demandas populacionais, será preciso um aumento de 50% na produção global de alimentos em comparação com os níveis registados em 2012 (ABERATHNA et al., 2022).

A expansão populacional intensifica a procura por fertilizantes fosfatados na agricultura. Contudo, esta expansão é acompanhada pelo aumento dos custos para os agricultores, impulsionados por desafios logísticos na produção e pelo esgotamento progressivo das reservas minerais finitas de fósforo (P). Tal cenário impõe desafios à segurança alimentar e à sustentabilidade agrícola, exigindo soluções que otimizem a eficiência e minimizem os impactos ambientais (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009).

O Brasil, um dos maiores produtores agrícolas globais, enfrenta uma alta dependência de fertilizantes importados, superando 80% de seu consumo. Essa vulnerabilidade expõe o agronegócio a flutuações de mercado e riscos geopolíticos, com custos anuais de importação que somam bilhões de dólares (CNA, 2023). Para mitigar essa dependência e fortalecer a segurança alimentar, o governo federal instituiu o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) em 2022. O PNF visa aumentar a produção nacional e otimizar a distribuição de fertilizantes, com a meta de atender entre 45% e 50% da demanda interna até 2050 (BRASIL, 2022).

As rochas fosfáticas, principal fonte de P, contêm tipicamente entre 5% e 40% de  $P_2O_5$  (pentóxido de difósforo), variando conforme o tipo e a pureza do depósito. Estas rochas são processadas para a produção de fertilizantes fosfatados, como o Superfosfato Simples (SFS) e o Superfosfato Triplo (SFT), largamente utilizados na agricultura.

A dependência desses fertilizantes, no entanto, acarreta desafios econômicos, como elevados custos de importação, e ambientais, como esgotamento de recursos não renováveis e poluição da água. Uma possível solução para este problema reside na exploração de fontes de fosfato mais econômicas e viáveis, incluindo alternativas ao fosfato convencional e estratégias para otimizar a sua utilização. Práticas como o emprego de microrganismos solubilizadores de fosfatos estão sendo investigadas como forma de aumentar a disponibilidade de P de modo mais sustentável (RICHARDSON, 2001; SHARMA et al., 2013; SILVA et al., 2023; WANG et al., 2023).

O P é um nutriente crítico para o desenvolvimento vegetal, desempenhando um papel fundamental nos principais processos biológicos, tais como fotossíntese, respiração e transporte de energia (RAGHOTHAMA, 1999; TAIZ et al., 2015). Um fornecimento adequado de P é crucial para assegurar o crescimento radicular, permitindo que as raízes explorem o solo mais profundamente em busca de nutrientes e água (GRANT et al., 2001). A escassez deste nutriente resulta num crescimento vegetal mais lento e num atraso no ciclo de vida das culturas (CARSTENSEN et al., 2018).

O milho (*Zea mays* L.), terceira cultura mais produzida globalmente, atrás apenas da cana-de-açúcar e do trigo, com 1,2 bilhão de toneladas/ano, é estratégico para a segurança alimentar e a economia agrícola. A sua proeminente posição no ranking mundial torna preocupante a sua sensibilidade à deficiência de P. Estudos demonstram que a absorção inadequada deste nutriente reduz em até 40% a biomassa da parte aérea e atrasa o ciclo fenológico (CONTINI et al., 2020; TAIZ et al., 2015). Este fato compromete a produtividade em escala global e pressiona ainda mais a procura por fertilizantes fosfatados, um recurso já sujeito a desafios ambientais e geopolíticos. Apesar disto, as estratégias para otimizar a eficiência do P nos estágios iniciais do milho, uma fase crucial para o estabelecimento da planta, ainda são incipientes, especialmente em solos tropicais com elevada capacidade de fixação do nutriente. Além disso, o P presente nos solos frequentemente se encontra em formas que as plantas não conseguem absorver facilmente, sendo necessário recorrer a fertilizantes para suprir a demanda agrícola (RESENDE et al., 2006).

A adubação fosfatada é um componente fundamental para a cultura do milho, pois fornece o nutriente para o desenvolvimento das plantas, estando envolvido desde o metabolismo e fornecimento de energia até o desenvolvimento radicular e maturação de frutos. No entanto, a eficiência de absorção do P pelas plantas de milho pode ser significativamente influenciada por fatores como a fonte de P utilizada e o método de aplicação do fertilizante (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Em estudo conduzido por VELOSO et al. (2016) avaliou-se a resposta do milho à adubação fosfatada em Latossolo Amarelo Distrófico no Oeste Paraense, utilizando superfosfato simples (SFS), superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural reativo de Bayóvar em diferentes doses. Os resultados demonstraram que o SFT foi a fonte mais eficaz, aumentando significativamente a produtividade de grãos e o teor de nutrientes nas folhas, em comparação com o SFS e o Bayóvar. Contudo, a dose ideal foi

identificada como 160 kg/ha de  $P_2O_5$ , evidenciando que, para além da escolha da fonte de P, determinar e aplicar a dose correta é fundamental para otimizar o crescimento do milho neste tipo de solo.

No Brasil, o milho é cultivado em todas as regiões, em mais de dois milhões de estabelecimentos agropecuários. Nas últimas décadas, o cultivo de milho passou por uma transformação significativa, tornando-se uma cultura comercial de alta eficiência. Essa eficiência deve-se ao aumento da produtividade, à expansão geográfica e temporal do cultivo, à integração tecnológica, à redução de custos, a melhorias na logística e comercialização, e à adoção de práticas sustentáveis. Estes avanços resultaram numa maior lucratividade para os produtores e fortaleceram a posição do Brasil no mercado global de milho (CONTINI et al., 2020).

É fundamental implementar estratégias de fornecimento de P adaptadas ao solo e à cultura. Exemplos destas incluem a aplicação localizada de fertilizantes organominerais e o uso de microrganismos (ex.: micorrizas arbusculares e *Pseudomonas* solubilizadoras), que aumentam a aquisição de P pelas plantas (SHARMA et al., 2013). Paralelamente, o desenvolvimento de cultivares de milho melhoradas, com raízes mais profundas e exsudatos ácidos, pode reduzir a dependência de fontes minerais, otimizando a sustentabilidade do sistema produtivo (DAKORA; PHILLIPS, 2002).

A aplicação de fertilizantes fosfatados assume um papel crítico na otimização da produtividade da cultura do milho, particularmente em solos tropicais como os encontrados no Brasil, onde a disponibilidade de P frequentemente se configura como o principal fator limitante ao desenvolvimento e rendimento das plantas (PAVINATO et al., 2021; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Investigações científicas recentes corroboram que uma gestão adequada da adubação fosfatada pode resultar em incrementos significativos na produção. Como exemplo, a adoção de tecnologias inovadoras que visam aprimorar a disponibilização e absorção de P pelas plantas, tal como o biofertilizante formulado com estirpes selecionadas das bactérias solubilizadoras de fosfato, *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*, demonstrou um ganho médio de produtividade de 8,6% em lavouras de milho em diversas regiões do Brasil. Este resultado provém de avaliações extensivas conduzidas e validadas pela Embrapa Milho e Sorgo, sediada em Sete Lagoas, Minas Gerais (OLIVEIRA et al., 2020).

O crescente interesse em práticas agrícolas sustentáveis tem conferido uma atenção cada vez maior a métodos que promovam o crescimento das plantas enquanto mitigam os impactos negativos no meio ambiente. A preservação da microbiologia do solo é de extrema importância dentro do sistema produtivo de áreas agrícolas. A microbiota destes solos desempenha um papel crucial na ciclagem de nutrientes, na sustentação do ecossistema e na cadeia alimentar de insetos e outros artrópodes, influenciando diretamente a ecologia e a dinâmica populacional de microrganismos no solo, pois afetam processos como a decomposição, a fixação de nitrogênio e a supressão de patógenos (FIERER, 2017).

Os biofertilizantes destacam-se como uma solução sustentável para reduzir a dependência de fertilizantes fosfatados. Ao serem utilizados, aumentam a eficiência do uso de P, melhoram a disponibilidade de nutrientes e promovem o crescimento das plantas de forma natural e econômica (ADESEMOYE; TORBERT; KLOEPPER, 2009; CALVO; NELSON; KLOEPPER, 2014).

Os biofertilizantes emergem como uma alternativa promissora para diminuir a dependência dos fertilizantes fosfatados solúveis, desempenhando um papel crucial na otimização da eficiência do uso de P em plantações de milho. A utilização de microrganismos benéficos e dos seus metabólitos, presentes nos biofertilizantes, pode incrementar significativamente a disponibilidade de P para as plantas. Estudos indicam que microrganismos solubilizadores de fosfato (MSF) podem aumentar a absorção de P pelas plantas em até 50% (SILVA et al., 2023; WANG et al., 2023), resultando em um uso mais eficiente deste nutriente. Por serem produtos naturais, os biofertilizantes não deixam resíduos tóxicos no solo, promovendo a conservação dos recursos naturais e a sustentabilidade dos agroecossistemas (CHOUYIA; VENTORINO; PEPE, 2022; WENDIMU; YOSEPH; AYALEW, 2023). A aplicação de P, especialmente quando otimizada pelo uso de biofertilizantes, reflete-se em ganhos morfológicos e fisiológicos expressivos para a cultura do milho.

Estes microrganismos aumentam a disponibilidade de P no solo, permitindo que os agricultores aproveitem as reservas de P insolúvel, que de outra forma estariam inacessíveis às plantas. Com menores gastos em fertilizantes, os agricultores podem alcançar maiores margens de lucro, promovendo uma agricultura mais sustentável e econômica. Esta prática não só maximiza a utilização dos recursos naturais, mas também minimiza os impactos ambientais negativos associados ao uso excessivo de fertilizantes minerais, como a contaminação de águas subterrâneas e a eutrofização

dos corpos hídricos, resultando numa abordagem mais ecológica e econômica para a fertilização das culturas (SULIEMAN; MÜHLING, 2021; WENDIMU; YOSEPH; AYALEW, 2023).

Estudos têm demonstrado resultados variados quanto à eficácia dos biofertilizantes na solubilização de P. Por exemplo, enquanto Sharma et al. (2013) relatam um aumento significativo na disponibilidade de P em solos tratados com biofertilizantes, a variabilidade na eficácia de inoculantes microbianos é um desafio reconhecido, sendo influenciada por fatores como a espécie de microrganismo, as condições edafoclimáticas e as práticas agrícolas (BASHAN et al., 2014; FIERER, 2017). Diferentes espécies de microrganismos possuem capacidades variadas de solubilizar fosfato.

Investigações no Brasil têm explorado estas combinações com resultados promissores para a cultura do milho, com destaque para a avaliação de fosfatos naturais em diferentes sistemas de cultivo (RESENDE et al., 2006). Em particular, estudos têm observado melhorias nos teores de P no solo e indicado a viabilidade de fosfatos naturais como fonte alternativa (FERREIRA; GOMES; SILVEIRA, 2009). Mais recentemente, o uso de termofosfato associado à adubação orgânica em sistema de plantio direto orgânico de milho no Paraná reforçou o potencial sinérgico destas práticas para a nutrição fosfatada sustentável da cultura (PILONETO, 2022).

É importante considerar que os mecanismos pelos quais os biofertilizantes atuam na solubilização do P ainda não são completamente compreendidos. Alguns autores sugerem que a eficácia dos biofertilizantes pode ser altamente dependente das condições ambientais e das características específicas do solo (BASHAN et al., 2014; CALVO; NELSON; KLOEPPER, 2014).

A eficácia dos biofertilizantes é intrinsecamente ligada às condições edáficas, sendo que solos com teores adequados de matéria orgânica e um pH equilibrado tendem a otimizar a atividade dos microrganismos benéficos neles contidos. Conforme apontado por estudos recentes, a correção do pH do solo, por exemplo através da calagem, é uma prática fundamental, especialmente em solos arenosos, para culturas como o milho, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Adicionalmente, a presença de matéria orgânica no solo não só melhora sua estrutura e capacidade de retenção de água, mas também serve como substrato e estimula a proliferação e atividade de microrganismos promotores de crescimento

vegetal (Bais et al., 2006; Silva et al., 2023). Em contrapartida, condições de solo com baixa fertilidade, deficiência de matéria orgânica ou valores de pH extremos podem restringir significativamente o potencial de ação desses insumos biológicos (FIERER, 2017).

Assim, investigações que se proponham a elucidar como a sinergia entre diferentes fontes de P e a aplicação de biofertilizantes específicos impacta o vigor e o desenvolvimento inicial da cultura do milho, especialmente sob condições controladas que permitam isolar variáveis, são de grande valia.

## **2 OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral**

Avaliar o efeito da combinação de fosfatos de solubilidades distintas com um biofertilizante comercial no desenvolvimento inicial de plantas de milho.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar a influência das fontes de P e biofertilizante no crescimento inicial de plantas de milho na altura da planta ao longo do tempo.
- Avaliar o impacto de diferentes fontes de P e de uso de biofertilizante na produção de matéria da parte aérea pelas plantas.
- Comparar os teores de clorofila a e b nas plantas tratadas com as fontes de P e o biofertilizante.
- Avaliar o efeito das fontes de P e do biofertilizante na condutância estomática, transpiração aparente, eficiência quântica do fotossistema II, taxa de transporte de elétrons e temperatura foliar.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Fontes, disponibilidade no solo e estratégias para melhorar o uso de P na agricultura

Diversas fontes de P são utilizadas na agricultura, entre as quais se incluem o fosfato natural (FN), o superfosfato triplo (SFT), o fosfato diamônico (DAP) e o fosfato monoamônico (MAP). O FN, resultante da moagem de rochas fosfáticas, contém P sob a forma de minerais de fosfato de cálcio e caracteriza-se por uma liberação lenta. Esta característica torna-o ideal para solos ácidos, pois proporciona um fornecimento contínuo de nutrientes ao longo do ciclo de cultivo (SILVA et al., 2023). Para ser considerado reativo, o fosfato natural deve ter um teor de  $P_2O_5$  de 20% a 35% e, mais importante, apresentar solubilidade mínima de 30% em ácido cítrico a 2% (LIMA; GOMES, 2018). Por ser menos solúvel em água, a sua liberação depende de condições específicas do solo. O processo de acidulação destas fontes converte os minerais de fosfato de cálcio menos solúveis em formas mais acessíveis às plantas, tornando o P prontamente disponível (SILVA et al., 2022).

O SFT, com aproximadamente 45% de  $P_2O_5$ , é uma fonte altamente solúvel, o que resulta numa rápida disponibilização de P, sendo ideal para solos com baixa fertilidade natural. Por sua vez, o DAP e o MAP são também amplamente utilizados devido à sua elevada solubilidade e concentração de P, que varia entre 30% e 50% de  $P_2O_5$ , demonstrando eficácia em diferentes tipos de solos.

O P desempenha funções biológicas essenciais em todos os organismos vivos, sendo o macronutriente cuja baixa concentração no solo mais frequentemente limita o crescimento de plantas cultivadas. Na agricultura, a sua baixa disponibilidade no solo pode restringir severamente o crescimento e a produtividade das culturas (TAIZ et al., 2015).

A eficiência de aquisição de P pelas plantas depende da exploração do solo e da absorção do nutriente, a qual é otimizada por cultivares eficientes, microrganismos solubilizadores e pelo manejo de fontes solúveis (BASHAN et al., 2014). Já a eficiência de utilização do P refere-se à conversão do P absorvido em biomassa (LAMBERS; CHAPIN; PONS, 2008).

Apesar da elevada procura de P pelas plantas, a sua disponibilidade no solo é limitada, principalmente devido à sua forte ligação com minerais que o tornam imóvel.

Além disso, o P pode ser imobilizado na matéria orgânica ou capturado por microrganismos, tornando-o inacessível para as plantas (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

No solo, o P é absorvido pelas raízes das plantas nas formas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , dependendo do pH do meio. No entanto, apenas uma fração do P total está disponível para as plantas, dado que este tende a fixar-se em partículas do solo e apresenta baixa mobilidade. A principal via de perda de P em campos agrícolas é a erosão, enquanto a lixiviação é rara e limitada (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

A deficiência de P afeta negativamente a fotossíntese, uma vez que o P é fundamental para a produção de ATP e NADPH, essenciais para a síntese de carboidratos. Em plantas de milho, a deficiência de P pode manifestar-se através de uma coloração arroxeada nas folhas mais velhas, indicando uma redistribuição inadequada de P para as folhas mais jovens, que se encontram em crescimento ativo. Este sintoma é comum em várias culturas e demonstra a mobilização insuficiente de P entre as folhas da planta (CARSTENSEN et al., 2018).

Um estudo com cana-de-açúcar demonstrou que, em condições de limitação de P, ocorre um aumento no custo energético para a planta adquirir este nutriente, resultando numa maior alocação de carbono para as raízes em detrimento da parte aérea (ZAMBROSI et al., 2015). A planta redireciona os seus recursos para a procura de P, o que leva a uma menor produção de biomassa aérea.

### **3.2 Efeitos do biofertilizante na nutrição de plantas e sustentabilidade agrícola**

Os biofertilizantes são preparações que contêm microrganismos vivos os quais, quando aplicados às sementes, às superfícies das plantas ou diretamente ao solo, colonizam a rizosfera ou o interior da planta, promovendo o crescimento vegetal. Esta promoção ocorre fundamentalmente através do aumento do fornecimento ou da disponibilidade de nutrientes primários à planta hospedeira, para além da produção de substâncias promotoras de crescimento e do incremento da resistência a estresses abióticos e bióticos (BASHAN et al., 2014).

Diferentemente dos fertilizantes minerais convencionais, que disponibilizam nutrientes de forma direta e frequentemente com rápida solubilização, os biofertilizantes atuam de maneira sinérgica e gradual com a microbiota e os componentes do solo. Este modo de ação facilita uma absorção de nutrientes mais

contínua e equilibrada pelas plantas, contribuindo significativamente para a saúde do solo e para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas (GHIMIREY et al., 2024).

A adoção de biofertilizantes alinha-se com as práticas agrícolas que visam a sustentabilidade a longo prazo, uma vez que otimizam a disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas, diminuindo a necessidade de fertilizantes sintéticos (GHIMIREY et al., 2024; NOSHEEN; AJMAL; SONG, 2021).

A redução da dependência de insumos sintéticos constitui um benefício relevante, pois o uso intensivo destes pode levar à contaminação de corpos d'água e ao aumento da emissão de gases de efeito estufa. Ao disponibilizarem nutrientes de forma gradual e ao melhorarem a sua captação pelas plantas, os biofertilizantes contribuem para a minimização destes impactos ambientais, fomentando práticas agrícolas mais ecológicas e economicamente viáveis, especialmente para pequenos agricultores que podem encontrar nos biofertilizantes uma alternativa para incrementar a produtividade das suas culturas de forma sustentável (GHIMIREY et al., 2024).

Os biofertilizantes são classificados com base nos tipos de microrganismos que os compõem, cada um com funções específicas no agroecossistema. Entre os principais grupos, destacam-se os rizóbios, bactérias que estabelecem uma relação simbiótica com plantas leguminosas, sendo fundamentais para a fixação biológica do nitrogênio atmosférico (FBN), convertendo-o numa forma assimilável pelas plantas.

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) formam outra importante categoria, expandindo consideravelmente a área de exploração do sistema radicular das plantas e aumentando significativamente a sua capacidade de absorver água e nutrientes, com particular destaque para o P, que possui baixa mobilidade no solo. As cianobactérias, também conhecidas como algas azuis, contribuem para a fertilidade do solo através da FBN e da produção de matéria orgânica, sendo especialmente relevantes em ambientes como os campos de arroz. Adicionalmente, um grupo diverso de bactérias, frequentemente denominadas como bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP), inclui aquelas com capacidade de solubilizar fosfatos minerais. Estas bactérias desempenham um papel crucial ao converterem formas insolúveis de P presentes no solo em fosfatos solúveis, que podem ser prontamente absorvidos pelas plantas, melhorando a nutrição fosfatada (ALOO et al., 2022; BASHAN et al., 2014; CALVO; NELSON; KLOEPFER, 2014).

Além de otimizar a disponibilidade de nutrientes, os biofertilizantes exercem um impacto positivo na saúde geral do solo, melhorando as suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Contribuem para o fortalecimento do sistema radicular das plantas, o que, por sua vez, aumenta a eficiência na absorção de água e nutrientes e melhora a resistência a diversos tipos de estresses, incluindo os de natureza hídrica e salina (BASHAN et al., 2014; CALVO; NELSON; KLOEPPER, 2014). Em solos degradados, a aplicação de biofertilizantes pode auxiliar na sua recuperação ao promover uma maior atividade microbiana e um aumento no teor de matéria orgânica, resultando em melhorias na estrutura do solo, na capacidade de retenção de água e na aeração (FIERER, 2017; NOSHEEN; AJMAL; SONG, 2021).

As plantas que recebem tratamento com biofertilizantes, seja através da inoculação de sementes, aplicação no solo ou foliar, frequentemente demonstram melhorias morfofisiológicas significativas. Observa-se, por exemplo, um aumento na taxa fotossintética, um maior teor de clorofila nas folhas e um crescimento vegetativo superior. Estes efeitos benéficos são atribuídos não apenas à melhor absorção de nutrientes, mas também à ação de fitormônios (como auxinas, giberelinas e citocininas) e outras substâncias bioativas que são produzidas ou disponibilizadas pelos microrganismos presentes nos biofertilizante (GHIMIREY et al., 2024). Desta forma, os biofertilizantes atuam como importantes aliados para o desenvolvimento robusto das culturas e para a otimização da produtividade agrícola de maneira sustentável.

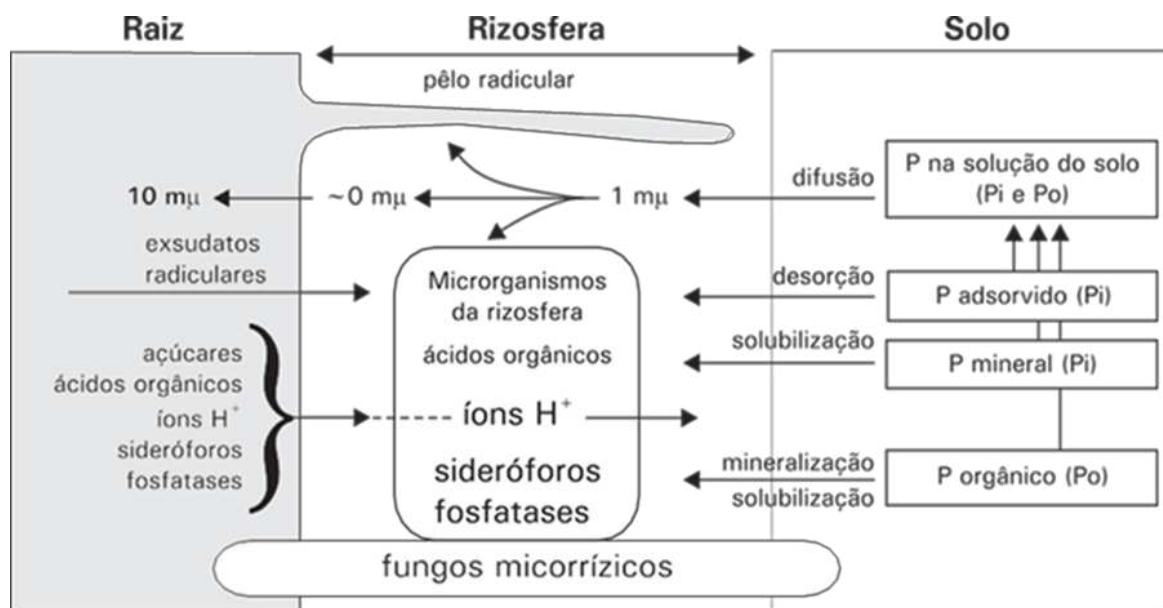
### **3.3 Dinâmica dos biofertilizantes no solo e a interação planta-microrganismo**

A eficácia dos biofertilizantes está intrinsecamente ligada à complexa dinâmica das interações que os microrganismos estabelecem com as plantas e o ambiente do solo, particularmente na rizosfera. Compreender estes mecanismos é fundamental para otimizar o seu uso na agricultura. Microrganismos como bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos melhoram a disponibilidade de nutrientes no solo, especialmente P, tornando-o mais acessível para as plantas, o que pode aumentar a absorção de P em até 50%. Estes microrganismos também alteram positivamente o metabolismo das plantas, aumentando a fotossíntese, a produção de clorofila e o crescimento geral das plantas (BASHAN et al., 2014). Assim, a interação entre plantas

e microrganismos não apenas melhora o acesso a nutrientes, mas também promove um desenvolvimento mais robusto das culturas.

Esta interação simbiótica é facilitada pela exsudação de compostos orgânicos, como açúcares e ácidos, que atraem microrganismos benéficos para a rizosfera (BAIS et al., 2006). Além disso, sinais químicos, como flavonoides, desempenham um papel crucial no recrutamento de microrganismos específicos, como rizóbios, que colonizam as raízes em simbioses mutualistas, melhorando a absorção de nutrientes (HASSAN; MATHESIUS, 2012). A exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes também altera o pH da rizosfera, favorecendo o crescimento de microrganismos benéficos e inibindo patógenos (DAKORA; PHILLIPS, 2002). As plantas, por sua vez, podem liberar compostos antimicrobianos, como fenóis e terpenoides, que inibem patógenos, enquanto os microrganismos promovem a absorção de nutrientes por diversos mecanismos (BASHAN et al., 2014; FIERER, 2017). Estes processos criam um ambiente rizosférico mais estável e saudável, promovendo o equilíbrio entre planta e solo. A Figura 1 apresenta os mecanismos pelos quais as raízes das plantas e os microrganismos da rizosfera contribuem para a solubilização de fosfatos inorgânicos no solo, os quais são diversos e interligados.

**Figura 1.** Representação esquemática dos principais fatores fisiológicos envolvidos na aquisição e mobilização de P pelas raízes das plantas e microrganismos da rizosfera

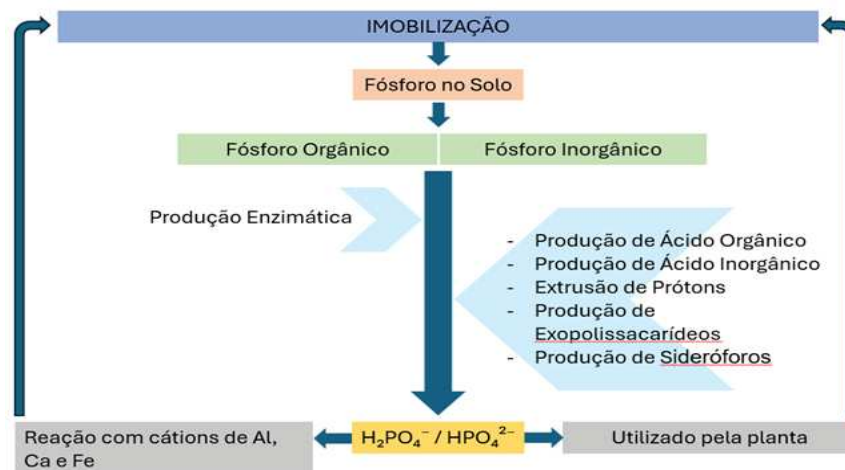


Fonte: RICHARDSON (2001)

Microrganismos presentes nos biofertilizantes solubilizam o P do solo, tornando-o disponível para as plantas por meio de enzimas como fosfatases, além de produzirem ácidos orgânicos que quelam cátions como ferro e alumínio, facilitando a liberação de P precipitado. A produção de sideróforos também sequestra íons metálicos, aumentando a disponibilidade de P, especialmente em solos com alta concentração de metais pesados (RICHARDSON, 2001; SHARMA et al., 2013). Como consequência, esses microrganismos não apenas tornam o P mais acessível, mas também contribuem para a melhoria da qualidade do solo.

Ademais, estes microrganismos promovem o crescimento de raízes laterais e pelos radiculares por meio da síntese e liberação de fitormônios vegetais, tais como auxinas e giberelinas, os quais ampliam a superfície radicular disponível para a absorção de nutrientes e água (ALOO et al., 2022). As interações simbióticas estabelecidas não só aumentam a disponibilidade imediata de P, mas também garantem a manutenção da fertilidade do solo a longo prazo, contribuindo para um ciclo eficiente e sustentável de nutrientes (FIERER, 2017; NOSHEEN; AJMAL; SONG, 2021). A Figura 2 exemplifica os principais mecanismos de solubilização de fosfato por microrganismos.

**Figura 2.** Mecanismos de solubilização de fosfato por microrganismos



Fonte: ABERATHNA et al. (2022)

Apesar dos seus inúmeros benefícios, a falta de conhecimento e a necessidade de educação e treinamento entre os agricultores ainda constituem barreiras para a adoção mais ampla dos biofertilizantes, o que é crucial para impulsionar práticas agrícolas mais sustentáveis (BASHAN et al., 2014; CALVO; NELSON; KLOEPPER, 2014).

### 3.4 Efeitos dos biofertilizantes na morfologia e fisiologia da planta

A aplicação de biofertilizantes, ao otimizar a disponibilidade de nutrientes e modular as interações planta-microrganismo na rizosfera, desencadeia uma série de respostas morfofisiológicas positivas nas plantas. A compreensão destes efeitos é crucial para avaliar o potencial dos biofertilizantes como ferramentas para uma agricultura mais produtiva e sustentável. Diversos indicadores podem ser utilizados para aferir o estado funcional e o vigor da planta em resposta a estes insumos biológicos, incluindo o crescimento vegetativo, a eficiência fotossintética e as trocas gasosas.

O desempenho dos processos fisiológicos da planta pode ser avaliado por meio de diferentes indicadores que refletem o estado funcional da mesma, como a produção de biomassa, altura de planta, teor de clorofila a e b, e medidas da fisiologia como condutância estomática, transpiração aparente, eficiência quântica do fotossistema II, taxa de transporte de elétrons e diferença de temperatura foliar.

A altura da planta e a produção de biomassa são indicadores diretos do crescimento e desenvolvimento vegetal, sendo frequentemente melhorados pela ação dos biofertilizantes. O P, cuja disponibilidade é aumentada pelos biofertilizantes, é de importância para o alongamento celular, a divisão celular e o desenvolvimento robusto do sistema radicular, fatores que sustentam um maior crescimento em altura (RAGHOTHAMA, 1999). Estudos demonstram que a inoculação com microrganismos promotores de crescimento pode incrementar significativamente a altura, como observado por (ADESEMOYE; TORBERT; KLOEPFER, 2009), que atribuíram este efeito à melhor nutrição e à produção de fitormônios pelos microrganismos.

Da mesma forma, a produção de biomassa reflete a acumulação de biomassa e a eficiência fotossintética global, que tende a aumentar com a aplicação de biofertilizantes. O P é um componente chave do ATP, a molécula de energia fundamental para a síntese de carboidratos. A melhoria na disponibilidade e absorção de P, facilitada pelos biofertilizantes, pode levar a um aumento substancial na produção de biomassa (GRANT et al., 2001). Esta sinergia entre a ação dos microrganismos e a nutrição fosfatada otimizada resulta frequentemente em plantas mais vigorosas e produtivas (BASHAN et al., 2014).

O teor de clorofila a e b é indicador importante da capacidade fotossintética da planta, pois estes pigmentos são responsáveis pela captação da energia luminosa. O

P desempenha um papel vital na fotossíntese, sendo um constituinte essencial de moléculas como ATP e NADPH, que são cruciais para as reações de conversão de energia (TAIZ et al., 2015). Uma nutrição fosfatada adequada, promovida pela ação de biofertilizantes, pode levar a um aumento nos teores de clorofila, melhorando a eficiência na captura de luz (SHARMA et al., 2013). ABERATHNA et al. (2022) já destacava que a melhoria na absorção de nutrientes e o aumento da atividade microbiana benéfica, proporcionados pelos biofertilizantes, podem maximizar os teores de clorofila e, conseqüentemente, a capacidade fotossintética da planta.

A eficiência quântica do fotossistema II e a taxa de transporte de elétrons são parâmetros que fornecem informações diretas sobre a eficiência da fase fotoquímica da fotossíntese (MAXWELL; JOHNSON, 2000). O P é fundamental para a integridade estrutural e funcional do fotossistema II (CARSTENSEN et al., 2018). Condições de estresse nutricional, como a deficiência de P, podem comprometer esses dois processos. A aplicação de biofertilizantes, ao assegurar um fornecimento contínuo e adequado de P e outros nutrientes, e ao mitigar estresses oxidativos através da ação de certos microrganismos, pode potencializar esses processos, resultando numa maior eficiência na conversão de energia luminosa em energia química (BASHAN et al., 2014; CALVO; NELSON; KLOEPPER, 2014).

Processos fisiológicos como a condutância estomática e a transpiração refletem a capacidade da planta em realizar trocas gasosas, absorção de CO<sub>2</sub> e liberação de O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, com a atmosfera (TAIZ et al., 2015). A disponibilidade de P influencia a regulação osmótica das células-guarda, que controlam a abertura e o fechamento dos estômatos. Níveis adequados de P podem otimizar a condutância estomática, permitindo uma maior assimilação de CO<sub>2</sub> para a fotossíntese e um controle mais eficiente da perda de água (CARSTENSEN et al., 2018). A transpiração, que está intrinsecamente relacionada à condutância estomática, também é afetada positivamente, contribuindo para um balanço hídrico adequado e para o controle térmico da folha (RAGHOTHAMA, 1999).

A diferença de temperatura da folha em relação à temperatura do ar é um indicador do estado hídrico da planta e da eficiência da transpiração. Uma transpiração eficiente ajuda a dissipar o calor da folha, evitando o superaquecimento, que pode ser prejudicial aos processos metabólicos (JONES, 2004; MAES; STEPPE, 2012). A adequada disponibilidade de P, o melhor desenvolvimento radicular e a maior absorção de água tendem a resultar numa menor diferença de temperatura. Isto indica

uma transpiração mais eficiente e um melhor controlo térmico, essencial para a manutenção da funcionalidade fisiológica da planta, especialmente sob condições de estresse térmico ou hídrico (BASHAN et al., 2014).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental foi desenvolvido com o propósito de avaliar o efeito de fosfatos e um biofertilizante líquido no desempenho de plantas de milho cultivadas em vasos com solo. Um experimento foi conduzido em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado, com tratamentos que combinaram sete fontes de P com o uso ou não de biofertilizante. As avaliações foram realizadas nas plantas do 5º ao 32º dia após emergência (DAE) das plantas do solo, com foco em variáveis indicadoras da eficiência de aquisição de P pelas plantas de milho.

A casa de vegetação onde o experimento foi realizado está localizada na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), *campus* Araras, em Araras, São Paulo, Brasil. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo Cfa, caracterizado como subtropical úmido sem estação seca definida, com verão quente e chuvas bem distribuídas ao longo do ano (ALVARES et al., 2013). A temperatura média anual local é de 21,3°C, com precipitação pluviométrica média anual de 1575 mm.

### 4.1 Coleta e preparo do material de solo usado no experimento

O material de solo utilizado no estudo foi coletado na camada arável, de 0 a 20 cm de profundidade, de uma área de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Ouroeste, SP. Após a coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado, homogeneizado e passado em peneira com malha de 4 mm. Os atributos químicos e físicos do material de solo foram determinados seguindo metodologias de RAIJ et al. (2001) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 1997) e estão apresentados na Tabela 1.

Depois de peneirado, o material de solo foi dividido em porções de 4 kg que foram incubadas em sacos plásticos com 3,0 g de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) puro (0,75 g/kg de solo) e 10% de umidade (m/m) por 14 dias para neutralização de parte da acidez do solo. A dose de  $\text{CaCO}_3$  foi estabelecida a partir da titulação do solo com  $\text{CaCO}_3$  para elevar o pH do solo a um valor de aproximadamente 6,20 (Figura 3).

Depois da incubação com  $\text{CaCO}_3$ , as porções de solo foram fertilizadas com os seguintes nutrientes e respectivas fontes (em mg/kg): 50 N-NH<sub>4</sub> e 97 S ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O), 50 N-NO<sub>3</sub> e 150 K (KNO<sub>3</sub>), 50 Mg (20 MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O e 30 MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O),

0,5 B ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), 1,5 Cu ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), 5,0 Fe (Fe-EDTA), 3,0 Mn ( $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), 0,1 Mo ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e 5,0 Zn ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). Após a fertilização, os fosfatos foram aplicados e misturados ao solo para posteriormente fazer-se a semeadura do milho.

**Tabela 1.** Atributos químicos e físicos do material de solo utilizado no experimento

P-rem	P resina	P Total	M.O.	COT	pH	pH	V	m
mg/L	mg/dm <sup>3</sup>		g/dm <sup>3</sup>		(CaCl <sub>2</sub> )	(SMP)	%	
33,46	11	199,59	9	5	5,3	7,14	74	0
K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	C.T.C.	S.B.	
mmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup>								
1,7	24	12	0,1	13	0	50,8	37,8	
Argila	Silte	Areia Total	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
g/kg			mg/dm <sup>3</sup>					
245	80	675	22	0,55	1	26	8,4	0,9

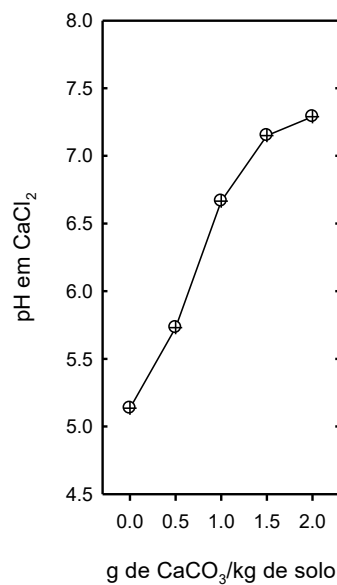
**P-rem:** P remanescente, mede a capacidade de retenção de P do solo. **P Resina:** P extraído com resina de troca aniônica, simulando a sua disponibilidade para as plantas. **P Total:** Determinado por digestão ácida, inclui P lábil e não-lábil. **M.O.:** Matéria orgânica medida pelo método Walkley-Black, que oxida compostos orgânicos. **COT:** Carbono orgânico total medido por combustão seca de matéria orgânica. **pH (CaCl<sub>2</sub>):** Medido em solução de cloreto de cálcio, fornecendo leituras mais estáveis de acidez. **pH (SMP):** Medido pelo método SMP, usado para estimar a necessidade de calagem. **V (Saturação por bases):** Percentual da CTC potencial ocupado por bases trocáveis (Ca, Mg, K, Na). **m (Saturação por alumínio):** Percentual da CTC efetiva ocupado por Al<sup>3+</sup>. **K, Ca, Mg, S:** Determinados por espectrometria de absorção atômica após extração específica. **Na<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>:** Determinados por titulação e espectrometria de absorção atômica. **C.T.C.:** capacidade de troca de cátions potencial, indica a capacidade do solo de reter nutrientes cátions. **S.B.:** Soma das bases trocáveis (Ca, Mg, K, Na). Teor de **argila, silte e areia:** medido pela análise granulométrica (método da pipeta). **B, Cu, Fe, Mn, Zn:** Determinados por espectrometria de absorção atômica após extração em DTPA.

## 4.2 Características do biofertilizante utilizado no experimento

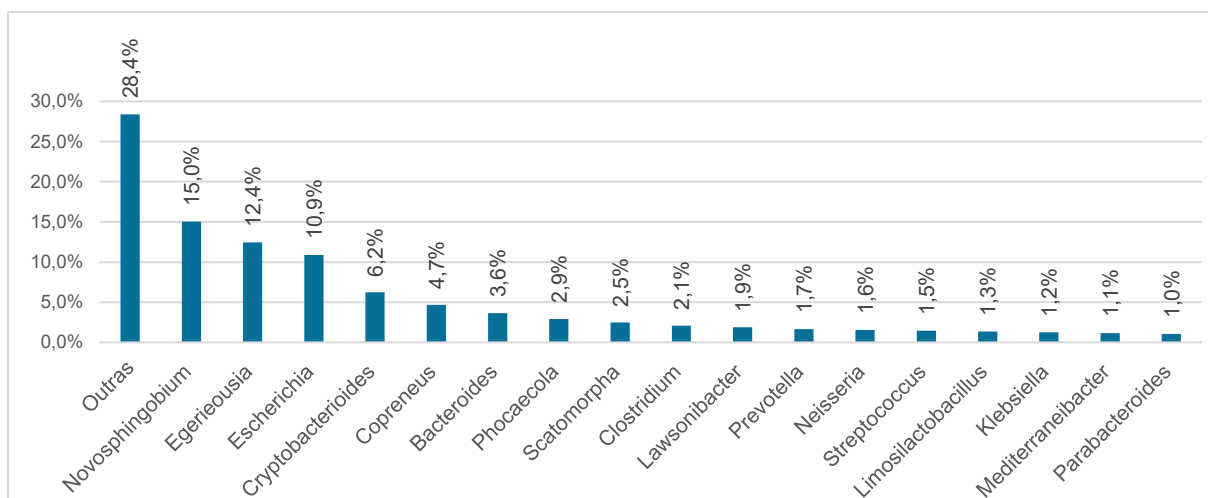
O biofertilizante utilizado no estudo, aqui denominado Biofertil, é um produto líquido, à base de água, que contém microrganismos e seus metabólitos. Para uma caracterização detalhada, foram realizadas as análises microbiológica e físico-química. A análise microbiológica teve como objetivo identificar a composição da comunidade microbiana presente no produto. Foram utilizadas técnicas de sequenciamento de DNA para identificar os microrganismos presentes. Um mililitro da amostra foi processado para extração de DNA total. Os genes 16S rDNA (para bactérias) e ITS (para fungos) foram amplificados e sequenciados na plataforma Illumina MiSeq. As sequências foram analisadas utilizando o software Qiime,

permitindo a identificação de microrganismos e suas abundâncias relativas. A Figura 4 apresenta a abundância relativa (%) dos principais gêneros de microrganismos identificados no Biofertil enquanto a Tabela 2 detalha a distribuição de cepas bacterianas por função. A Tabela 3 apresenta as características físico-químicas do Biofertil.

**Figura 3.** Variação da acidez ativa (pH) do Latossolo Vermelho como resultado da aplicação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )



**Figura 4.** Abundância relativa (%) dos principais gêneros de bactérias identificadas no Biofertil



Análise de sequenciamento de DNA (genes 16S rDNA e ITS). Gêneros com abundância relativa individual inferior a 1,0% estão agrupados em 'Outras' (28,4%). Abundância relativa: Proporção de indivíduos de um determinado gênero microbiano em relação ao total de indivíduos presentes em uma amostra, expressa em porcentagem.

**Tabela 2.** Distribuição de cepas bacterianas no biofertilizante por função

<b>Função</b>	<b>Cepas de Bactérias por Função</b>
Biocontrole	16
Fixadoras de nitrogênio	15
Promotoras de crescimento	15
Produção de fitormônios	14
Solubilizadoras de nutrientes	10
Produtoras de sideróforos	6

**Tabela 3.** Características químicas e físicas do Biofertil

<b>Variável</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Acidez ativa	pH	7,8
Densidade	g/mL	0,98
Matéria Orgânica	g/L	0,47
Carbono Orgânico (CO)	g/L	0,26
Nitrogênio Total (N)	g/L	0,70
Fósforo Total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	g/L	0,07
Potássio Total (K <sub>2</sub> O)	g/L	0,01
Sódio (Na)	mg/L	40
Cálcio (Ca)	g/L	0,12
Magnésio (Mg)	g/L	0,02
Enxofre (SO <sub>4</sub> )	g/L	55,07
Cobre (Cu)	mg/L	0,10
Ferro (Fe)	mg/L	16,2
Manganês (Mn)	mg/L	0,3
Zinco (Zn)	mg/L	2,7

Métodos: Acidez ativa - potenciometria (pH); densidade - relação massa/volume; P total - digestão ácida e determinação por colorimetria; K e Na totais - digestão ácida e determinação por fotometria de chama; S (SO<sub>4</sub>) total - digestão ácida e determinação pelo método gravimétrico do sulfato de bário; Cu, Zn, Mn, Fe, Ca e Mg (totais) - digestão ácida e determinação por absorção atômica (Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos, MAPA. 2017). Nitrogênio total - digestão sulfúrica/Kjeldahl.

### 4.3 Características dos fosfatos utilizados no experimento

Quatro fosfatos foram avaliados no experimento: Superfosfato Triplo (SFT), Mistura de Fosfatos (MFS), Fosfato natural importado Gafsa (GAF) e Fosfato Natural Nacional (FNN). Os fosfatos GAF e FNN são fosfatos naturais e foram escolhidos por serem fontes de liberação lenta, supostamente a uma taxa inferior à taxa de demanda da planta, que podem apresentar melhor desempenho nesse quesito a partir da interação com os microrganismos solubilizadores de minerais e seus metabólitos

presentes no Biofertil. O fosfato GAF é uma fonte natural conhecida, de origem sedimentar e produzido na Tunísia, e amplamente usado na agricultura brasileira e o FNN também é uma fonte de origem sedimentar, mas produzido no Brasil, e menos conhecido e estudado do que o GAF. O SFT foi empregado como uma fonte de referência, de alta solubilidade em água e amplamente usada na agricultura. E o MFS, por ser uma mistura de fosfatos, composto por 80% de FNN e 20% de SFT, foi empregado como uma alternativa aos fosfatos de alta solubilidade e àqueles de menor solubilidade, que pode atender a demanda da planta por P durante o desenvolvimento inicial. A Tabela 4 apresenta o teor de P total e P solúvel em duas soluções distintas dos quatro fosfatos utilizados.

Os fosfatos GAF e FNN, além do tratamento em que foram aplicados diretamente ao solo, também foram empregados em pré-tratamento com Biofertil antes da aplicação no solo, originando as variantes GAF-P e FNN-P do fator fontes de P. Neste pré-tratamento, a umidade dos fosfatos foi elevada para 14% (volume de água/massa de fosfato seco), dos quais dois pontos percentuais foram compostos pelo Biofertil (2 mL/100 g de fosfato). Em seguida, os fosfatos tratados foram incubados por uma semana, com o intuito de promover a interação entre os componentes do Biofertil e as rochas fosfáticas, potencialmente estimulando reações bioquímicas que pudessem aumentar a disponibilidade de P no solo e, conseqüentemente, sua absorção pelas plantas.

**Tabela 4.** Teor de P total, solúvel em ácido cítrico, solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) + água, e total nominal dos fosfatos usados no estudo

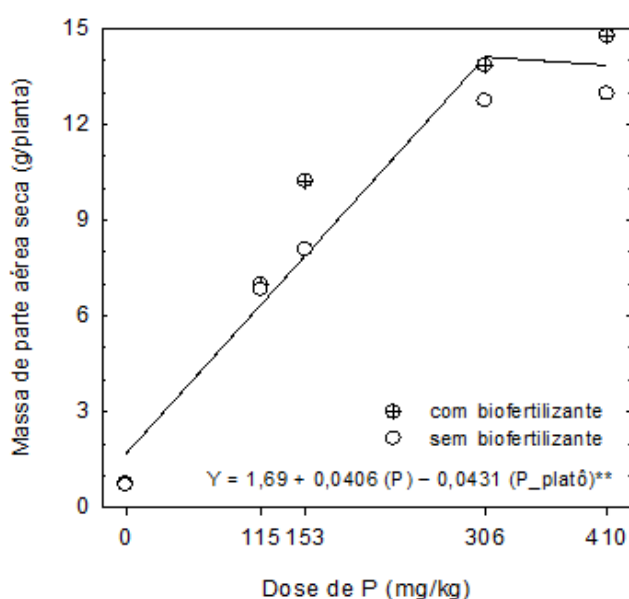
Fosfatos	P Total	P Ácido Cítrico	P CNA + água	P Total Nominal (Fabricante)
SFT	47,68	46,87	40,68	46,00
MFS	26,32	12,73	10,21	25,00
GAF	28,27	10,52	4,84	29,00
FNN	16,51	4,82	2,08	15,00

Os valores apresentados correspondem à porcentagem de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no fertilizante (em peso), considerando três frações: P Total, que representa o teor total de P na amostra; P solúvel em ácido cítrico 2% (20g/L), que indica a fração potencialmente disponível para as plantas; e P solúvel em CNA + água, correspondente à porção mais prontamente disponível.

#### 4.4 Determinação das doses de fósforo e do biofertilizante líquido

O P foi aplicado ao solo em uma única dose, definida pela metodologia que usa o valor de P-remanescente (P-rem) como base para obtenção de curvas de resposta em ensaios em casa de vegetação (ALVAREZ V. et al., 2000). Neste ensaio preliminar, utilizou-se um solo com 35% de argila e P-rem de 26 mg/L. Para valores de P-rem na faixa de 19 a 30 mg/L, a dose máxima recomendada é de 410 mg/kg de P. A resposta de plantas de milho às doses de P no ensaio preliminar está apresentada na Figura 5.

**Figura 5.** Produção de biomassa de parte aérea por plantas de milho em resposta às doses de P aplicadas ao solo como monofosfato de cálcio e uso de biofertilizante



Ao se analisar a curva de resposta, observou-se estabilização da produção de biomassa de parte aérea das plantas a partir de 306 mg/kg de P, valor que corresponde a 75% da dose máxima de 410 mg/kg sugerida por ALVAREZ V. et al. (2000). Diante desse resultado, e considerando o valor de P-rem do material de solo coletado para o experimento, 33 mg/L, estabeleceu-se a dose de 262,5 mg/kg de P, que corresponde a 75% da dose máxima recomendada de 350 mg/kg para solos com P-rem entre 30 e 44 mg/L. Após a definição da dose de P, foram calculadas e pesadas as doses dos fosfatos SFT, MFS, FNN e GAF com base na concentração de P total

presente em cada um. Em seguida, os fosfatos foram homogeneamente incorporados ao volume total de solo em cada vaso do experimento.

De acordo com os limites de interpretação de teor de P em solos do Boletim 100 do Instituto Agrônômico (IAC) (RAIJ et al., 1997), o teor de 11 mg/dm<sup>3</sup> pelo método da resina (P resina) para o presente material de solo é baixo para culturas anuais, como o milho. O mesmo Boletim recomenda a aplicação de 90 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para uma produtividade esperada de 8 a 10 t/ha de milho. Esta quantidade de P adicionada ao solo da camada de 0 a 20 cm de um hectare (quantidade que corresponde a 2.000.000 kg de solo) produziria uma concentração de 20 mg/kg de P. Somados aos 11 mg/kg de P presentes no solo, a concentração de P seria de 31 mg/kg de P.

Os fosfatos foram aplicados no solo para produzir uma concentração de 262,5 mg/kg de P. Esta concentração é, portanto, de aproximadamente 10 vezes a concentração de P que se teria no solo do campo. Esse fator de 10 vezes foi considerado na definição da dose a aplicar do biofertilizante líquido. Considerando que em um hectare há um estande de 55.556 plantas de milho (espaçamento entre linhas de 0,90 m e 5 plantas por metro linear) e que a dose de biofertilizante é de 150 L/ha em cada uma das duas aplicações recomendadas, cada planta receberia um volume de 2,7 ml por aplicação. Assim, decidiu-se aplicar 25 ml por vaso em cada uma das duas aplicações. Na primeira aplicação, a dose de 25 ml foi dividida em 5 ml em cada uma das cinco sementes semeadas, e na segunda aplicação, a dose de 25 ml foi aplicada em volta da única planta deixada em cada vaso.

#### **4.5 Montagem e condução do experimento**

As plantas de milho cultivadas foram do cultivar híbrido IAC 8390, que é um material intervarietal desenvolvido pelo Instituto Agrônômico (IAC), indicado tanto para a produção de grãos quanto para silagem. Possui alta tolerância às principais doenças foliares do milho, com destaque para a ferrugem polissora e nos ensaios regionais conduzidos no Estado de São Paulo durante a safra 2009/2010, ele apresentou produtividade média de 8.714 kg/ha na região Sul e 8.326 kg/ha na região Noroeste, mostrando bom desempenho agrônômico. Seus grãos são mais duros e com coloração alaranjada mais intensa do que os de outros materiais comerciais, e as folhas apresentam porte predominantemente semiereto e largura média, características que favorecem o aproveitamento da radiação solar.

A semeadura foi realizada manualmente no dia 26 de março de 2024, distribuindo-se cinco sementes por vaso a uma profundidade de aproximadamente 4 cm. Na semeadura, aplicou-se o Biofertil diretamente no furo de semeadura, sobre as sementes. A dose de Biofertil utilizada foi de 5 mL por semente, ou 5 mL de água nos tratamentos sem Biofertil, totalizando 25 mL por vaso, aplicado sem incorporação ao solo (Figura 6).

Cinco dias após emergência das plântulas, foi realizado o desbaste, deixando apenas uma planta por vaso. Durante todo o experimento, os vasos foram pesados e irrigados diariamente, utilizando água destilada para restabelecer o grau de umidade do solo para próximo da capacidade de campo. Além da aplicação de Biofertil na semeadura, houve uma segunda aplicação em cobertura aos 12 DAE das plantas, quando a aplicação dele foi feita ao redor do caule da planta, totalizando 25 ml (Figura 6). Duas fertilizações minerais em cobertura foram realizadas aos 16 e 26 DAE das plantas com 75 mg/kg de K e 50 mg/kg de N (25 N-NO<sub>3</sub> e 25 N-NH<sub>4</sub>) em cada uma delas, sendo que a segunda fertilização, aos 26 DAE, foi aplicada somente no solo daqueles tratamentos onde as plantas estavam maiores (ver Resultados e Discussão).

**Figura 6.** Aplicação de biofertilizante no solo, localizada no furo de semeadura (à esquerda) e espalhada na superfície do solo, em cobertura (à direita)



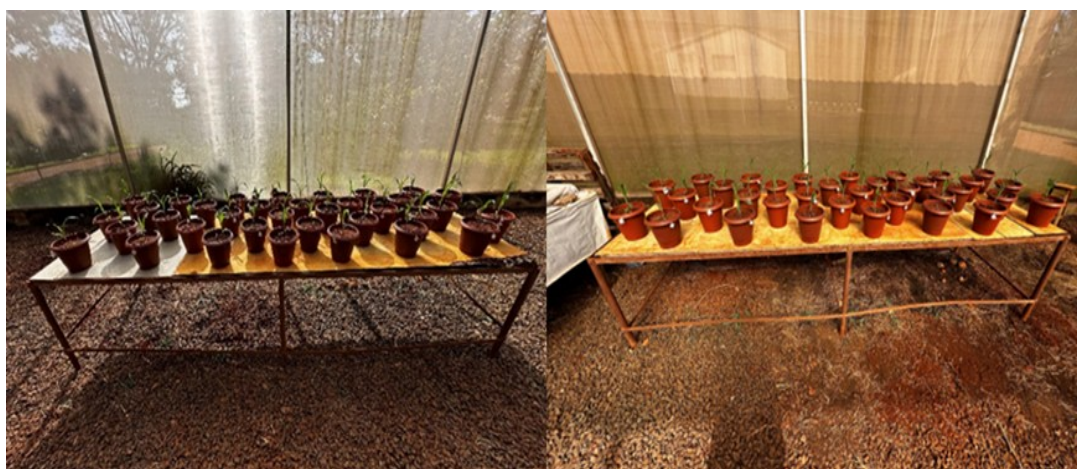
#### 4.6 Delineamento e tratamentos experimentais e variáveis avaliadas

No fator fontes de P, além dos fosfatos houve uma variante controle, sem adição de fosfato, denominada SAF, no qual as plantas dependeriam exclusivamente do P do material de solo, sem qualquer adição de fertilizante fosfatado. As sete fontes de P consideradas, SFT, MFS, FNN, GAF, FNN-P, GAF-P e SAF, foram combinadas com dois valores do biofertilizante líquido, sendo com e sem aplicação de biofertilizante. A combinação completa entre esses dois fatores gerou 14 tratamentos, que foram repetidos cinco vezes, totalizando 70 unidades experimentais. A unidade experimental foi constituída por um vaso com 4 kg de material de solo com uma planta de milho. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com os vasos distribuídos aleatoriamente em duas bancadas na casa de vegetação (Figura 7).

As variáveis avaliadas e analisadas estatisticamente foram altura de planta (AP), teor de clorofila A (TCa) e teor de clorofila B (TCb), condutância estomática (CE), transpiração aparente (TA), eficiência quântica do fotossistema II (EQFII), taxa de transporte de elétrons (TTE), diferença de temperatura foliar (DTF) e produção de matéria de parte aérea seca (MPAS).

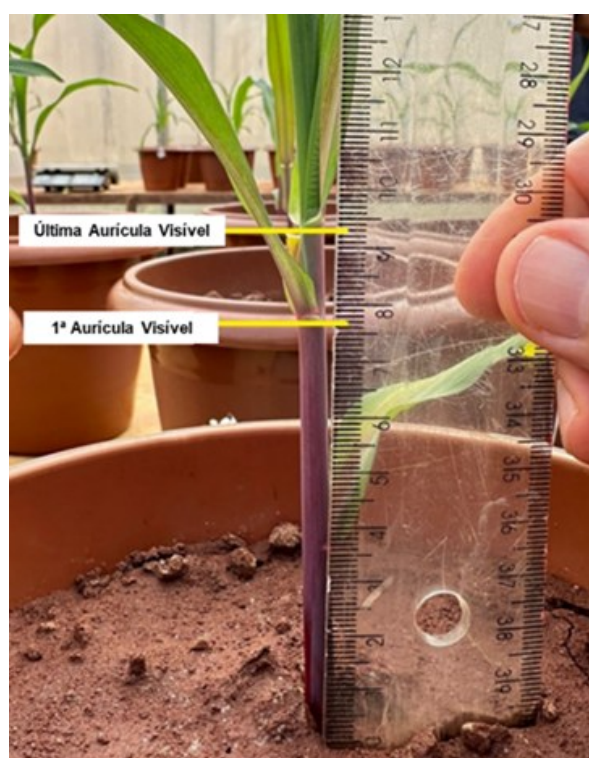
A altura da planta foi mensurada da superfície do solo no vaso até a última aurícula visível (aurícula da folha mais jovem completamente desenvolvida) no topo da planta utilizando uma régua graduada posicionada verticalmente ao lado da planta (Figura 8). Foram realizadas seis avaliações de AP, aos 5, 12, 15, 20, 26 e 32 DAE.

**Figura 7.** Distribuição dos vasos em duas bancadas em casa de vegetação



As avaliações de clorofila (TCa e TCb) foram realizadas com um clorofilômetro da marca ClorofiLOG®, modelo CFL 1030, produzido pela Falker Automação Agrícola, o qual expressa os resultados em um índice próprio denominado ICF: Índice de Clorofila Falker (FALKER, 2008). Para as avaliações de variáveis da fotossíntese (CE, TA, EQFII, TTE e DTF) foi utilizando o aparelho LI-COR®, modelo LI-600. As leituras foram feitas no terço médio da folha expandida mais nova cuja aurícula estava visível (Figura 9). Estas avaliações foram realizadas aos 18 e 32 DAE e as variáveis foram selecionadas como indicadores significativos do desempenho vegetal em resposta ao fornecimento de P pelo solo e fertilizantes.

**Figura 8.** Medição da altura de planta com régua graduada



Ao final de 32 dias de cultivo, após emergência das plântulas, a parte aérea das plantas foi cortada rente à superfície do solo e acondicionada em sacos de papel. Esses sacos foram levados à estufa com circulação forçada de ar a 65°C, onde permaneceram por 72 horas para secagem. Somente após a secagem, o material foi pesado individualmente, determinando-se o valor MPAS.

**Figura 9.** Medição do teor de clorofila a e b e das variáveis da fotossíntese



Foi realizado o cálculo do Índice de Eficiência Agronômica (IEA), com o objetivo de comparar a eficiência das diferentes fontes de P, considerando as variáveis de altura de planta (AP) e massa da parte aérea seca (MPAS).

Temos como fórmula de cálculo do IEA:

$$\text{IEA} = (\text{Tratamento} - \text{Controle} / \text{Padrão} - \text{Controle}) \times 100$$

Onde:

- **IEA:** Índice de Eficiência Agronômica, expresso em porcentagem.
- **Tratamento:** Valor da variável observado no tratamento em estudo (por exemplo, altura de planta, produção de biomassa).
- **Controle:** Valor observado no tratamento controle, onde não foi aplicado um fertilizante como fonte do nutriente.
- **Padrão:** Valor observado no tratamento padrão ou referência, que é considerado 100% eficiente (por exemplo, SFT).

Para avaliar as diferenças entre os tratamentos testados, foram realizados contrastes ortogonais conforme a Tabela 5. Esses contrastes permitem comparar diretamente as fontes de P, agrupadas ou individualmente.

**Tabela 5.** Contrastes ortogonais entre fontes de P para variáveis do desenvolvimento inicial de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido

<b>Fator</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>Fontes de P</b>					
SAF	0	4	0	0	0
FNN	0	-1	1	0	1
FNN-P	0	-1	-1	0	1
GAF	0	-1	0	1	-1
GAF-P	0	-1	0	-1	-1
MFS	1	0	0	0	0
SFT	-1	0	0	0	0

As análises estatísticas incluíram análises de variância, testes de média e contrastes ortogonais entre os tratamentos para todas as variáveis medidas. Todos os dados coletados foram submetidos a análise estatística utilizando o software R (R CORE TEAM, 2008).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação entre fontes de P e uso de Biofertil não mostrou efeito significativo para as variáveis AP e MPAS, indicando que o efeito das fontes de P é independente do uso do Biofertil e vice-versa (Tabela 6). Os resultados mostram, por outro lado, que o fator fontes de P teve impacto significativo no desenvolvimento inicial das plantas de milho nas duas variáveis medidas e o fator Biofertil teve efeito significativo na altura de planta aos 12 DAE. Nesta idade, as plântulas dos vasos que receberam Biofertil estavam mais altas do que aquelas dos vasos que não receberam Biofertil. Este efeito, no entanto, não se manteve significativo nas medições seguintes.

**Tabela 6.** Resumo da análise de variância com P-valor para as fontes de variação nas variáveis altura de planta (AP) nas diferentes medições ao longo do cultivo e matéria de parte aérea seca (MPAS) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido

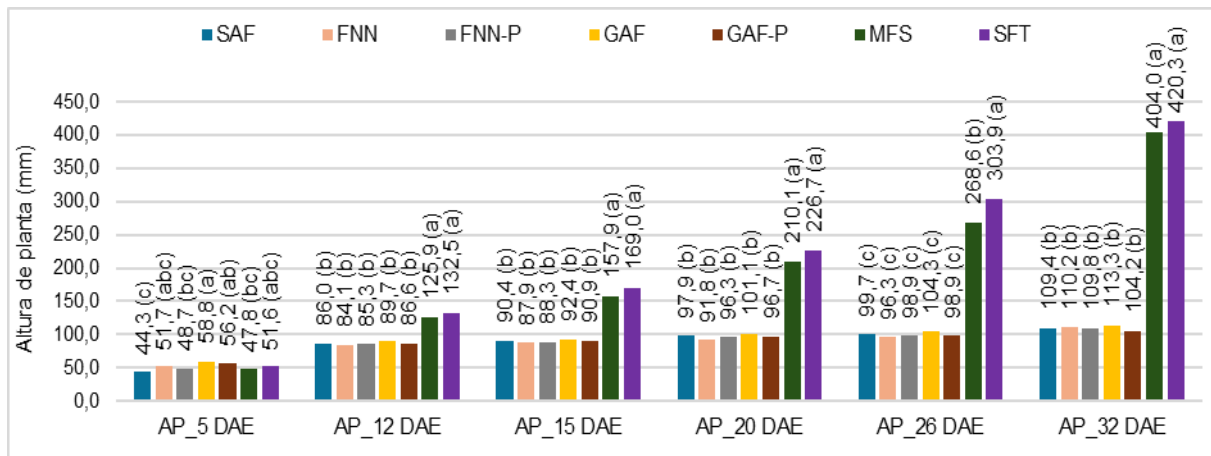
FONTE DE VARIÇÃO	GL	AP_5 DAE	AP_12 DAE	AP_15 DAE	AP_20 DAE	AP_26 DAE	AP_32 DAE	MPAS
FONTES DE P (P)	6	<0,01**	<0,01**	<0,01**	<0,01**	<0,01**	<0,01**	<0,01**
BIOFERTIL (B)	1	0,4651	0,0306*	0,0583	0,1130	0,0502	0,4160	0,4830
INTERAÇÃO (P)x(B)	6	0,0818	0,2318	0,2967	0,2690	0,0799	0,0850	0,7370
CV %	-	14,26	9,56	9,92	10,17	10,23	11,90	24,64

\*\* : P-valor menor que 0,01 ( $p < 0,01$ ), indica uma significância estatística a 1%

\* : P-valor menor que 0,05 ( $p < 0,05$ ), indica uma significância estatística a 5%

O efeito altamente significativo do fator fontes de P está discriminado na Figura 10, onde se pode observar que os fosfatos MFS e SFT foram os que proporcionaram o maior desenvolvimento das plantas e que o efeito foi consistente nas medições ao longo de todo o cultivo. Os fosfatos naturais, FNN e GAF, por sua vez, não proporcionaram desenvolvimento superior significativo ao proporcionado pelo tratamento sem adição de fosfato, independentemente do pré-tratamento que tiveram com o Biofertil. Os resultados positivos para MFS e SFT e nulo para FNN, FNN-P, GAF e GAF-P também foram observados com a variável MPAS (Figura 11).

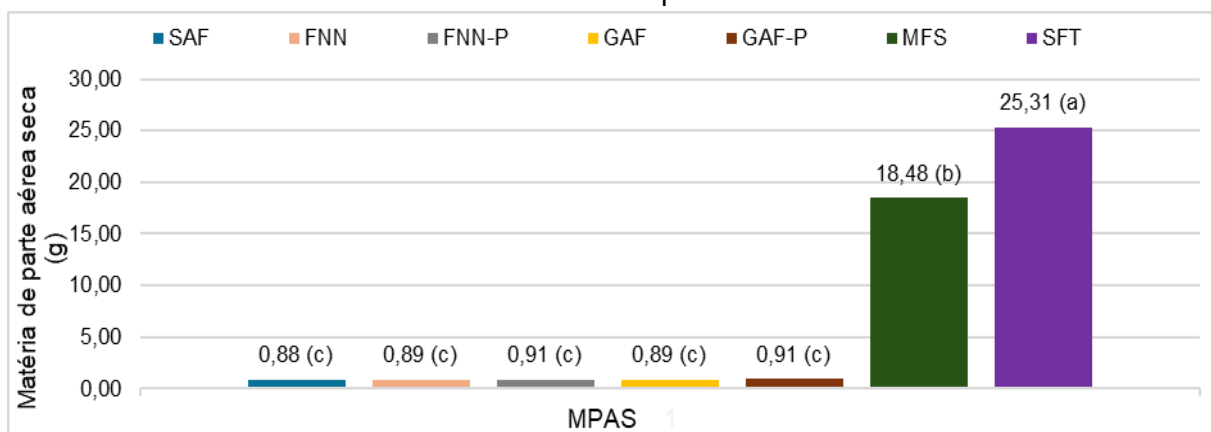
**Figura 10.** Altura de planta (AP) em diferentes dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si. P nativo do solo (SAF), Fosfato Natural Nacional (FNN), Fosfato Natural Nacional pré-tratado com Biofertil (FNN-P), Fosfato Gafsa (GAF), Fosfato Gafsa pré-tratado com Biofertil (GAF-P), Mistura de Fosfatos (MFS) e Superfosfato Triplo (SFT).

A análise de contraste revelou uma diferença estatisticamente significativa entre MFS e SFT para a variável MPAS (Tabela 7). Ela também revelou que o pré-tratamento dos fosfatos naturais com biofertilizante antes de sua aplicação no solo não resultou em acréscimo no desenvolvimento inicial das plantas de milho. Dentre os fosfatos testados, o MFS teve índice de eficiência agrônômica de 95% para AP e 72% para MPAS comparado ao valor de 100% do SFT, considerado referência no fornecimento adequado de P às plantas (Tabela 8).

**Figura 11.** Massa da parte aérea seca (MPAS) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si.

**Tabela 7.** Estimativas e significância estatística (P-valor) dos contrastes entre fontes de P para altura de planta aos 32 dias após emergência (AP\_32DAE) e matéria de parte aérea seca (MPAS) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido

<b>Fator</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>Fontes de P</b>					
SAF	0	4	0	0	0
FNN	0	-1	1	0	1
FNN-P	0	-1	-1	0	1
GAF	0	-1	0	1	-1
GAF-P	0	-1	0	-1	-1
MFS	1	0	0	0	0
SFT	-1	0	0	0	0
<b>AP_32DAE</b>					
Estimativa (mm)	-16,30	0,10	0,40	9,10	2,50
P-valor	0,1236	0,9976	0,9695	0,3865	0,8660
<b>MPAS</b>					
Estimativa (g)	-6,83	-0,07	-0,03	-0,03	0,00
P-valor	<0,0001	0,9759	0,9739	0,9707	0,9993

O teor de P extraível por resina do solo utilizado no experimento, de 11 mg/dm<sup>3</sup>, é considerado baixo para culturas anuais como o milho (RAIJ et al., 1997), o que implica na necessidade de aplicação de fosfato que aumente o fornecimento de P para as plantas e assim assegure produção economicamente viável. O solo utilizado no experimento, um Latossolo Vermelho, exibe atributos químicos e físicos que exercem influência determinante na dinâmica do P, como teor de argila, grau de intemperização, acidez e capacidade de adsorção de P. A elevada capacidade de adsorção de P deste tipo de solo, evidenciada pelo valor de P-rem de 33 mg/L, é uma característica de solos tropicais intemperizados, ricos em óxidos de Fe e Al, que pode comprometer a eficiência de fertilizantes fosfatados convencionais, limitando a disponibilidade do nutriente para as plantas (GATIBONI et al., 2020).

O rápido crescimento e produção de biomassa das plantas de milho observado com os fosfatos SFT e MFS foi sustentado pela sua rápida dissolução no solo, o que

garantiu um suprimento adequado de P às plantas. O mesmo não ocorreu nos fosfatos de menor solubilidade, onde o suprimento de P foi insuficiente para atender a demanda da planta. O resultado obtido com o MFS, fabricado a partir da mistura de fosfato solúvel com fosfato natural, sugere uma alternativa viável para diminuir a aplicação de fosfato solúvel sem comprometer o fornecimento de P na fase inicial de desenvolvimento do milho. A fração solúvel da mistura de fosfatos pode suprir as plantas inicialmente, sem aumentar demasiadamente a concentração de fosfato na solução do solo e, assim, aumentar a sua adsorção na fase sólida, e a fração de menor solubilidade da mistura pode manter um suprimento mais lento para atendimento da demanda mais tardia da planta. Se isso de fato ocorrer, haverá uma economia na aquisição e aplicação de fosfato no solo, uma vez que a mistura de fosfatos tem menor custo do que o fosfato totalmente acidulado solúvel e uma menor adsorção e acúmulo de P no solo.

**Tabela 8.** Índice de Eficiência Agronômica (IEA) das fontes de P estudadas considerando altura de planta (AP) e matéria de parte aérea seca (MPAS) aos 32 dias após emergência das plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido

FONTES DE P	SAF	FNN	FNN-P	GAF	GAF-P	MFS	SFT
IEA (%) – AP	0,00	0,26	0,13	1,25	-1,67	94,76	100,00
IEA (%) – MPAS	0,00	0,02	0,13	0,06	0,13	72,05	100,00

Uma grande parte do P que fica prontamente disponível na solução do solo logo após a aplicação do fertilizante mineral solúvel pode ser rapidamente adsorvida pela fase sólida do solo e se tornar pouco disponível às plantas com o passar do tempo; fenômeno este responsável pelo acúmulo de P no solo. O valor de 200 mg/dm<sup>3</sup> de P total do solo usado no experimento (Tabela 1) sugere que parte do P aplicado neste solo enquanto ele estava sob cultivo de cana-de-açúcar ficou retido no solo. Na dose e frequência em que o Biofertil foi aplicado ao solo no presente estudo não se observou mobilização significativa desse P acumulado, uma vez que não houve diferença significativa entre os tratamentos SAF com Biofertil e SAF sem Biofertil.

A diminuição da acidez do solo alcançada com a aplicação de CaCO<sub>3</sub> teve o objetivo de provocar a precipitação de Fe<sup>3+</sup> e Al<sup>3+</sup> no solo na forma de Fe(OH)<sub>3</sub> e Al(OH)<sub>3</sub> e assim diminuir a ligação deles aos íons fosfatos H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> liberados

pelos fertilizantes, ligação esta que os tornariam menos disponíveis às plantas. Esta diminuição da acidez, por outro lado, pode ter contribuído para uma menor dissolução das partículas dos fosfatos naturais, levando a uma pequena liberação de íons fosfatos na solução do solo. Os FNs não tiveram efeito no desenvolvimento das plantas, verificado pela ausência de diferença de altura e biomassa das plantas entre os tratamentos com eles e aquele sem aplicação de fosfato ao solo.

A análise do biofertilizante detectou  $2,04 \pm 0,86 \times 10^8$  UFC/mL de bactérias totais viáveis. A biodiversidade microbiana do biofertilizante, avaliada pelo Índice de Shannon (H') de 5,17, indica uma elevada riqueza e uniformidade na distribuição das populações de microrganismos (MAGURRAN, 2004). Este valor, considerado alto para comunidades microbianas, sugere um biofertilizante com grande potencial funcional e resiliência, capaz de oferecer uma ampla gama de benefícios para a planta e o solo devido à sua composição diversificada e equilibrada. A caracterização da comunidade microbiana, detalhada na Figura 4, tem destaque para os gêneros *Novosphingobium* (15,0%), *Egerieousia* (12,4%), *Escherichia* (10,9%) e *Cryptobacterioides* (6,2%). A predominância de *Novosphingobium* assume particular relevância agrônômica, visto que diversas espécies deste gênero são amplamente reconhecidas pela capacidade de solubilizar diferentes formas de fosfato inorgânico, tornando-o acessível às plantas (CHEN et al., 2021). Adicionalmente, a presença expressiva do gênero *Egerieousia* pode estar correlacionada com um potencial incrementado para a ciclagem de nutrientes, especialmente quanto à decomposição de compostos orgânicos complexos. Esta capacidade é fundamental, pois bactérias heterotróficas desempenham um papel central na mineralização da matéria orgânica do solo, liberando nutrientes, incluindo o P (BINI; LOPEZ, 2016).

Dentre as espécies de bactérias consideradas benéficas às plantas, ou seja, aquelas com efeitos positivos sobre a saúde e o crescimento de plantas, a análise do biofertilizante também revelou abundância relativa entre 0,35 e 1,00% das seguintes espécies e respectivos grupos funcionais: *Clostridium* sp., promotora de crescimento, fixadora de nitrogênio e biocontrole; *Clostridium perfringens*, promotora de crescimento, fixadora de nitrogênio e biocontrole; *Klebsiella pneumoniae*, promotora de crescimento, fixadora de nitrogênio e produção de fitormônios; *Lactobacillus* sp., biocontrole; *Nocardioides* sp., promotora de crescimento e biocontrole. Apesar desta abundância e diversidade, não se observou efeito positivo no aumento do fornecimento de P pelos fosfatos naturais e nem pelo solo.

A análise de variância para o Índice de Clorofila Falker para clorofila *a* e *b* das plantas medido aos 18 e 32 DAE está na Tabela 9. Os resultados mostram que as fontes de P tiveram um efeito altamente significativo nas duas variáveis analisadas e em ambas as idades da planta em que foram medidas. O uso do Biofertil não apresentou efeito significativo em nenhuma das variáveis e não houve interação significativa entre fontes de P e Biofertil. O resultado do teste de média aplicado às fontes de P está apresentado na Figura 12.

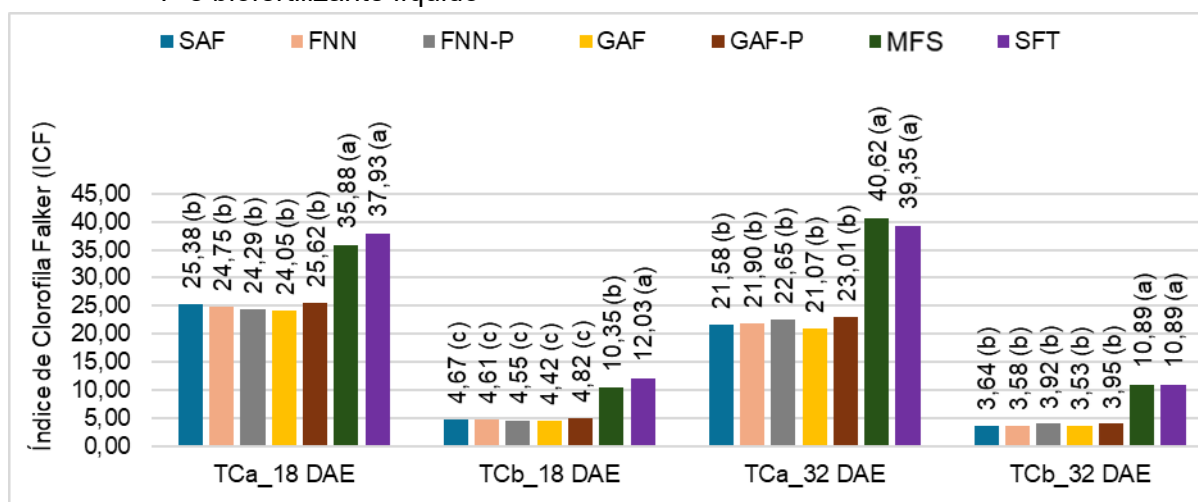
**Tabela 9.** Resumo da análise de variância com P-valor para as fontes de variação nas variáveis Índice de Clorofila Falker para clorofila *a* (TCa) e para clorofila *b* (TCb) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	TCa_18 DAE	TCb_18 DAE	TCa_32 DAE	TCb_32 DAE
FONTES DE P (P)	6	<0,01**	<0,01**	<0,01**	<0,01**
BIOFERTIL (B)	1	0,618	0,471	0,555	0,150
INTERAÇÃO (P)x(B)	6	0,568	0,471	0,802	0,201
CV %	-	9,03	16,70	12,75	15,45

\*\* : P-valor menor que 0,01 ( $p < 0,01$ ), indica uma significância estatística a 1%

\* : P-valor menor que 0,05 ( $p < 0,05$ ), indica uma significância estatística a 5%

**Figura 12.** Índice de Clorofila Falker para clorofila *a* (TCa) e *b* (TCb) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si

Valores consistentemente maiores de clorofila *a* e *b* nos dois momentos de medição são observados nas fontes de P de maior solubilidade, SFT e MFS. Nos

tratamentos onde se empregou os fosfatos naturais FNN e GAF, independente do pré-tratamento com Biofertil, os valores observados são menores e indiferentes do valor da fonte de P controle, SAF. Embora o baixo suprimento de P por estas fontes tenha comprometido significativamente a síntese de clorofila, o efeito foi proporcionalmente menor do que aquele verificado na variável acúmulo de biomassa. O valor médio de clorofila a nas plantas cultivadas com as fontes SAF, FNN, FNN-P, GAF e GAF-P alcançou 61% do valor médio observado nas plantas com SFT e MFS. Considerando a clorofila b, o valor médio destas mesmas cinco fontes de P alcançou 38% do valor observado nas plantas com as fontes SFT e MFS. Essas porcentagens são muito superiores ao valor de 4% da biomassa produzida nos tratamentos com SFT e MFS alcançada pelas fontes sem adição de fosfato ou com FNs. É possível que a redução de biomassa da planta tenha advindo da menor síntese de clorofila a e b concomitantemente com o menor tamanho das folhas (i.e. menor área foliar), ou seja, a taxa de fotossíntese foi bem menor nos tratamentos com déficit de P no solo.

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise de variância para algumas variáveis da fisiologia da planta relacionadas a transpiração, transporte de elétrons na fotossíntese e controle de temperatura da folha. Eles indicam que as diferentes fontes de P tiveram um efeito altamente significativo ( $p < 0,01$ ) em todas as variáveis analisadas tanto aos 18 quanto aos 32 DAE. As variáveis analisadas incluem a CE, TA, EQFII, TTE e DTF. O Biofertil não mostrou efeito significativo em nenhuma dessas variáveis em ambos os períodos, exceto por uma tendência observada na TA ( $p < 0,1$ ). Além disso, não foi observada interação significativa entre as fontes de P e o biofertilizante, sugerindo que os efeitos das fontes de P são independentes da aplicação do biofertilizante em todas as variáveis analisadas aos 18 e 32 DAE. Os valores médios das variáveis calculados nas distintas fontes de P e o resultado do teste de média delas estão nas Figuras 13 a 17.

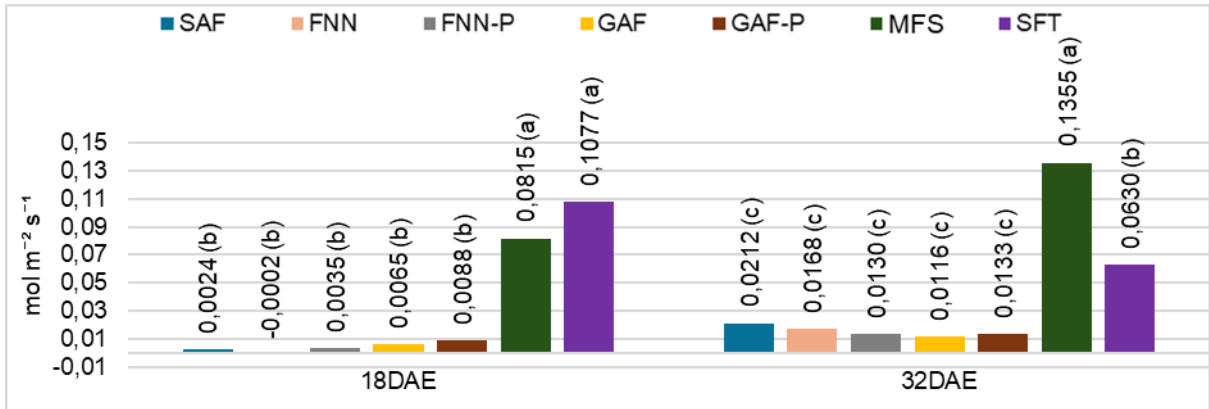
**Tabela 10.** Resumo da análise de variância com P-valor para as fontes de variação nas variáveis Condutância Estomática (CE), Transpiração Aparente (TA), Eficiência Quântica do Fotossistema II (EQFII), Taxa de Transporte de Elétrons (TTE) e Diferença de temperatura entre a folha e o ar (DTF) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido

<b>FONTE DE VARIAÇÃO</b>	<b>GL</b>	<b>VARIÁVEL</b>	<b>P-valor (18 DAE)</b>	<b>P-valor (32 DAE)</b>
FONTES DE P (P)	6			
		CE	<0,01**	<0,01**
		TA	<0,01**	<0,01**
		EQFII	<0,01**	<0,01**
		TTE	<0,01**	<0,01**
		DTF	<0,01**	<0,01**
BIOFERTIL (B)	1			
		CE	0,2080	0,1300
		TA	0,0574	0,0653
		EQFII	0,7740	0,5710
		TTE	0,1880	0,4780
		DTF	0,2440	0,4370
INTERAÇÃO (P)x(B)	6			
		CE	0,4100	0,1300
		TA	0,4218	0,0598
		EQFII	0,9750	0,2750
		TTE	0,6530	0,1550
		DTF	0,4260	0,8390
CV (%)	-			
		CE	87,76	77,62
		TA	79,19	67,26
		EQFII	33,72	41,68
		TTE	35,12	44,24
		DTF	-792,93	104,38

\*\* : P-valor menor que 0,01 ( $p < 0,01$ ), indica uma significância estatística a 1%

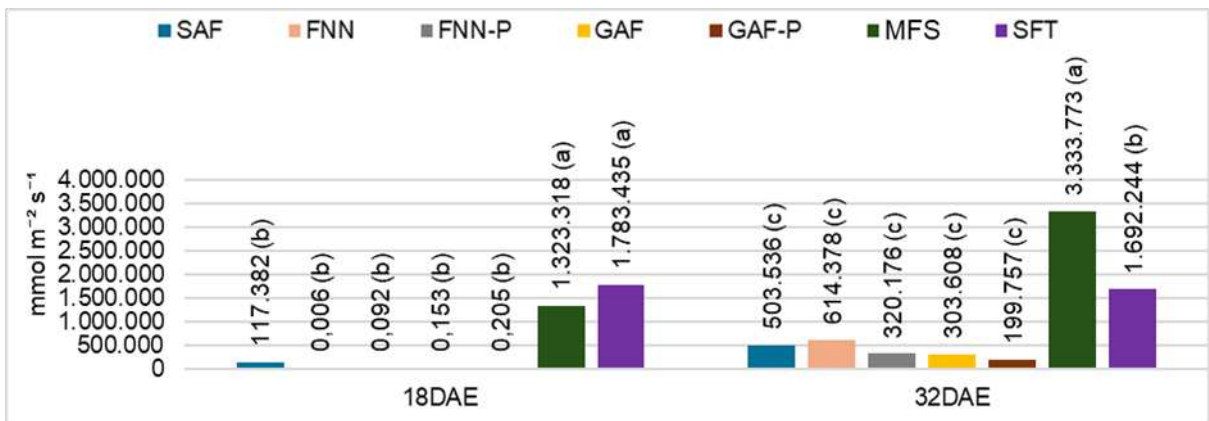
\* : P-valor menor que 0,05 ( $p < 0,05$ ), indica uma significância estatística a 5%

**Figura 13.** Condutância Estomática (CE) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



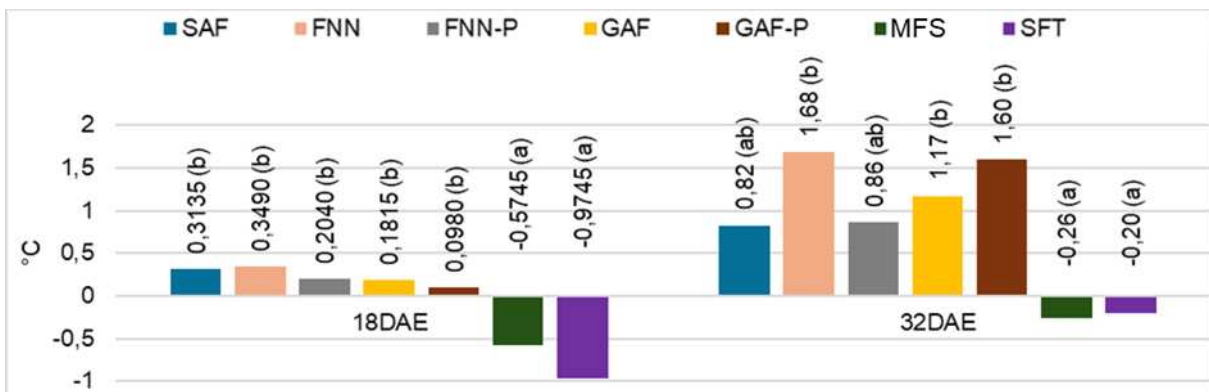
Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si

**Figura 14.** Eficiência Quântica do Fossistema II (EQFII) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



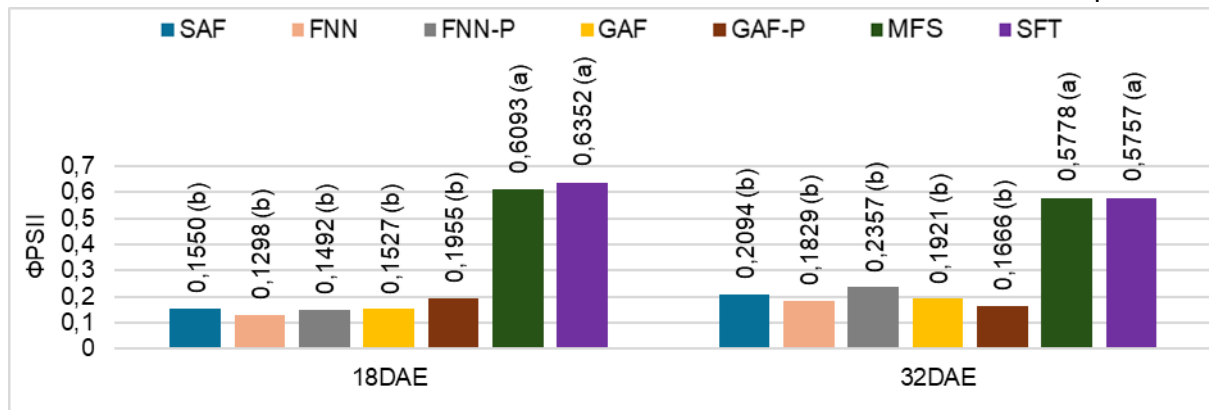
Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si

**Figura 15.** Diferença entre a Temperatura da Folha da planta e do ar (DTF) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



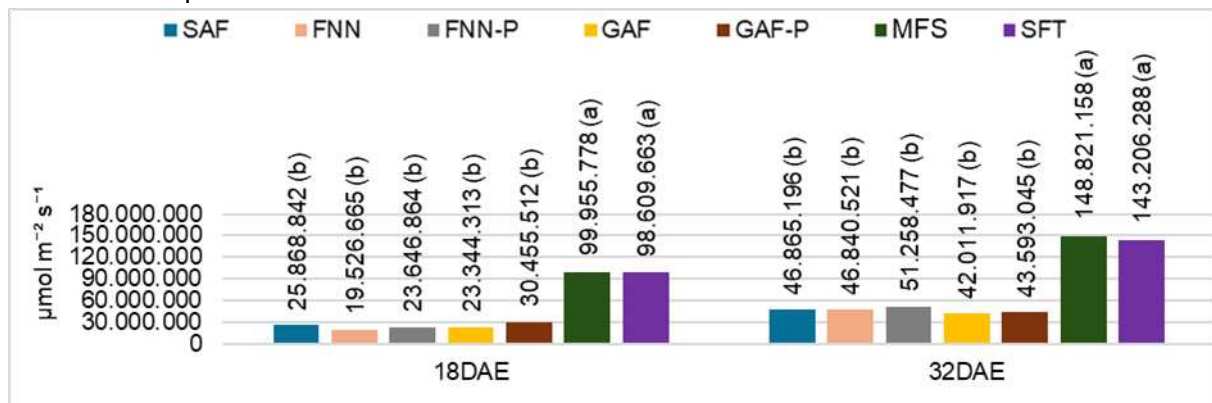
Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si

**Figura 16.** Transpiração Aparente (TA) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si

**Figura 17.** Taxa de Transporte de Elétrons (TTE) aos 18 e 32 dias após emergência (DAE) de plantas de milho cultivadas em solo com fontes distintas de P e biofertilizante líquido



Médias que compartilham a mesma letra pertencem ao mesmo grupo estatístico, não apresentando diferença significativa entre si

A análise das variáveis fisiológicas aos 18 e 32 DAE indicou que SFT e MFS geralmente promoveram os melhores resultados para CE (Figura 13), EQFII (Figura 14), TA (Figura 16) e TTE (Figura 17). Em ambas as avaliações, SFT e MFS frequentemente agruparam-se estatisticamente com os maiores valores (letra "a"), distinguindo-se das demais fontes. Este desempenho superior sugere que a maior disponibilidade imediata de P otimizou processos metabólicos (RAGHOTHAMA, 1999; TAIZ et al., 2015). Maiores CE e TA indicam maior captação de CO<sub>2</sub> e fluxo hídrico eficiente (MAXWELL; JOHNSON, 2000). Valores elevados de EQFII e TTE refletem maior eficiência fotoquímica, dependente do P para ATP, NADPH e membrana tilacoide (MAXWELL; JOHNSON, 2000). Este resultado sugere uma maior atividade

estomática e fluxo de água nas plantas supridas com P de maior solubilidade, o que pode estar relacionado a um melhor estado hídrico e maior capacidade de troca gasosa (BASHAN et al., 2014). As fontes FNN, GAF, FNN-P e GAF-P, por sua vez, apresentaram valores de TA inferiores, indicando menor atividade transpiratória. Uma TTE mais elevada indica uma maior eficiência na cadeia de transporte de elétrons do fotossistema II, crucial para a produção de ATP e NADPH utilizados na fixação de CO<sub>2</sub> (CARSTENSEN et al., 2018).

Na variável DTF (Figura 15), MFS e SFT apresentaram consistentemente os menores valores, negativos inclusive, diferindo dos demais tratamentos, que tiveram DTF mais elevada. Menor DTF sugere melhor status hídrico e maior capacidade de resfriamento foliar com MFS e SFT, benéfico para a fotossíntese. DTF positiva nos outros tratamentos pode indicar algum estresse (JONES, 2004; MAES; STEPPE, 2012).

A Tabela 11 apresenta a matriz de correlação de Pearson, enquanto a Figura 18 exibe o mapa de calor com o dendrograma das correlações entre as variáveis analisadas. A matriz de correlação de Pearson e o mapa de calor com dendrograma revelam diversas interrelações significativas entre as variáveis de crescimento, bioquímicas e fisiológicas avaliadas. Observa-se uma consistência no desenvolvimento das plantas, evidenciada pelas correlações fortes ( $r > 0,8$ ) e positivas entre as variáveis relacionadas à AP nos diferentes estágios de crescimento. A correlação entre AP\_15DAE e AP\_20DAE indica que o padrão de crescimento estabelecido nos primeiros 15 dias após a emergência se manteve até os 20 dias. Similarmente, correlações igualmente fortes foram observadas entre AP\_26DAE e AP\_32DAE, sugerindo que as plantas que apresentaram maior vigor nos estágios iniciais mantiveram essa vantagem de crescimento ao longo do ciclo avaliado.

Quanto aos pigmentos fotossintéticos, verificou-se uma forte correlação positiva entre os teores de TCa e TCb aos 32 DAE, refletindo a resposta conjunta e a interdependência desses pigmentos na captação de energia luminosa para a fotossíntese. A manutenção de uma proporção adequada entre clorofila a e b é fundamental para a eficiência do processo fotossintético (TAIZ et al., 2015).

**Tabela 11.** Matriz de Correlação de Pearson para Variáveis Fisiológicas e Bioquímicas em plantas aos 18 e 32 DAE

VAR.	AP_5 DAE	AP_12 DAE	AP_15 DAE	AP_20 DAE	AP_26 DAE	AP_32 DAE	TCa_18 DAE	TCb_18 DAE	TCa_32 DAE	TCb_32 DAE	MSPA	CA_18 DAE	TA_18 DAE	EQFIL_18 DAE	TTE_18 DAE	DTF_18 DAE	CA_32 DAE	TA_32 DAE	EQFIL_32 DAE	TTE_32 DAE	DTF_32 DAE
AP_5 DAE	-	0,116	0,025	-0,007	-0,047	-0,061	-0,181	-0,128	-0,077	-0,114	-0,047	-0,187	-0,179	-0,215	-0,189	0,167	-0,118	-0,109	-0,059	-0,127	0,061
AP_12 DAE	0,116	-	0,97	0,962	0,946	0,915	0,783	0,821	0,778	0,851	0,894	0,711	0,773	0,773	0,794	-0,568	0,582	0,692	0,72	0,695	-0,595
AP_15 DAE	0,025	0,97	-	0,99	0,979	0,96	0,848	0,88	0,852	0,897	0,943	0,788	0,838	0,849	0,857	-0,644	0,65	0,736	0,761	0,744	-0,617
AP_20 DAE	-0,01	0,962	0,99	-	0,994	0,979	0,871	0,902	0,87	0,922	0,962	0,815	0,863	0,867	0,871	-0,665	0,669	0,758	0,776	0,765	-0,62
AP_26 DAE	-0,05	0,946	0,979	0,994	-	0,987	0,888	0,92	0,877	0,932	0,977	0,83	0,878	0,881	0,883	-0,684	0,658	0,765	0,778	0,77	-0,614
AP_32 DAE	-0,06	0,915	0,96	0,979	0,987	-	0,906	0,937	0,898	0,946	0,975	0,847	0,892	0,887	0,887	-0,693	0,705	0,784	0,791	0,788	-0,619
TCa_18 DAE	-0,18	0,783	0,848	0,871	0,888	0,906	-	0,977	0,863	0,908	0,914	0,885	0,879	0,917	0,902	-0,746	0,64	0,733	0,728	0,734	-0,537
TCb_18 DAE	-0,13	0,821	0,88	0,902	0,92	0,937	0,977	-	0,874	0,938	0,953	0,899	0,919	0,902	0,882	-0,773	0,65	0,763	0,756	0,764	-0,563
TCa_32 DAE	-0,08	0,778	0,852	0,87	0,877	0,898	0,863	0,874	-	0,945	0,889	0,774	0,79	0,873	0,887	-0,655	0,766	0,832	0,813	0,829	-0,563
TCb_32 DAE	-0,11	0,851	0,897	0,922	0,932	0,946	0,908	0,938	0,945	-	0,934	0,845	0,879	0,895	0,885	-0,718	0,749	0,854	0,82	0,854	-0,591
MSPA	-0,05	0,894	0,943	0,962	0,977	0,975	0,914	0,953	0,889	0,934	-	0,835	0,876	0,887	0,891	-0,699	0,637	0,77	0,784	0,772	-0,589
CA_18 DAE	-0,19	0,711	0,788	0,815	0,83	0,847	0,885	0,899	0,774	0,845	0,835	-	0,946	0,895	0,827	-0,889	0,624	0,705	0,661	0,695	-0,486
TA_18 DAE	-0,15	0,746	0,808	0,833	0,846	0,858	0,868	0,898	0,757	0,852	0,841	0,96	-	0,836	0,777	-0,827	0,624	0,719	0,683	0,718	-0,523
EQFIL_18 DAE	-0,22	0,773	0,849	0,867	0,881	0,887	0,917	0,902	0,873	0,895	0,887	0,895	0,831	-	0,971	-0,801	0,672	0,747	0,735	0,74	-0,535
TTE_18 DAE	-0,19	0,794	0,857	0,871	0,883	0,887	0,902	0,882	0,887	0,885	0,891	0,827	0,783	0,971	-	-0,698	0,654	0,738	0,732	0,731	-0,518
DTF_18 DAE	0,167	-0,568	-0,644	-0,665	-0,684	-0,693	-0,746	-0,773	-0,655	-0,718	-0,699	-0,889	-0,79	-0,801	-0,698	-	-0,51	-0,546	-0,507	-0,526	0,423
CA_32 DAE	-0,12	0,582	0,65	0,669	0,658	0,705	0,64	0,65	0,766	0,749	0,637	0,624	0,655	0,672	0,654	-0,51	-	0,796	0,771	0,806	-0,585
TA_32 DAE	-0,11	0,692	0,736	0,758	0,765	0,784	0,733	0,763	0,832	0,854	0,77	0,705	0,746	0,747	0,738	-0,546	0,796	-	0,949	0,991	-0,565
EQFIL_32 DAE	-0,06	0,72	0,761	0,776	0,778	0,791	0,728	0,756	0,813	0,82	0,784	0,661	0,715	0,735	0,732	-0,507	0,771	0,949	-	0,961	-0,718
TTE_32 DAE	-0,13	0,695	0,744	0,765	0,77	0,788	0,734	0,764	0,829	0,854	0,772	0,695	0,748	0,74	0,731	-0,526	0,806	0,991	0,961	-	-0,586
DTF_32 DAE	0,061	-0,595	-0,617	-0,62	-0,614	-0,619	-0,537	-0,563	-0,563	-0,591	-0,589	-0,486	-0,551	-0,535	-0,518	0,423	-0,585	-0,565	-0,718	-0,586	-

Em contrapartida, a DTF apresentou correlações negativas significativas com diversas variáveis fisiológicas, indicando que um aumento da DTF pode estar associado a uma queda na eficiência geral da planta. A DTF pode assumir valores positivos (folha mais quente que o ar) ou negativos (folha mais fria que o ar). Valores positivos elevados frequentemente indicam estresse hídrico, com fechamento estomático para conservar água, reduzindo o resfriamento evaporativo e elevando a temperatura foliar. Já valores negativos são típicos de plantas com boa disponibilidade hídrica e transpiração ativa, que resfria a folha (JONES, 2004; MAES; STEPPE, 2012). A presença de ambas as situações no experimento (valores positivos e negativos de DTF) reflete a resposta diferencial das plantas aos tratamentos com P, onde fontes mais efetivas podem ter promovido melhor status hídrico e, conseqüentemente, menor DTF.



A correlação negativa entre DTF\_18DAE e TCa\_18DAE sugere que um aumento na temperatura foliar está relacionado a uma redução nos níveis de clorofila a. Este fenômeno pode ser atribuído à degradação de pigmentos ou inibição de sua síntese sob condições de estresse térmico ou hídrico (ANJUM et al., 2011). Similarmente, a correlação negativa entre DTF\_32DAE e a EQFII\_32DAE indica que plantas com maior DTF apresentam menor eficiência fotoquímica. O estresse associado ao aumento da DTF pode danificar o aparato fotossintético, especialmente o FSII, impactando diretamente a capacidade da planta em converter energia luminosa em energia química (BAKER, 2008).

A Figura 18 destaca a forte correlação positiva observada entre EQFII e a TTE, tanto aos 18 DAE quanto aos 32 DAE. Esta relação é esperada, pois uma maior eficiência na captura de luz pelo FSII (EQFII) naturalmente leva a um maior fluxo de elétrons através da cadeia fotossintética (TTE), resultando em maior produção de ATP e NADPH (GENTY; BRIANTAIS; BAKER, 1989). Esse comportamento é um indicativo de que os tratamentos que otimizaram a fotoquímica proporcionaram uma melhoria geral nas condições metabólicas das plantas, promovendo uma maior assimilação de carbono e, potencialmente, maior acúmulo de biomassa.

Para as variáveis de trocas gasosas, como a CE\_18DAE e a TA\_18DAE, a correlação positiva observada é fisiologicamente consistente. Plantas com maior abertura estomática (maior CA) tendem a apresentar maiores valores TA, o que, sob condições hídricas adequadas, pode estar associado a uma maior absorção de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, a uma maior taxa fotossintética e produção de biomassa (LAMBERS; CHAPIN; PONS, 2008).

## 6 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser feitas:

Os fosfatos de maior solubilidade em água, SFT e MFS, foram mais efetivos do que os FNs, FNN e GAF, no fornecimento de P às plantas de milho para o seu desenvolvimento inicial. O pré-tratamento dos FNs com Biofertil não alterou sua capacidade de fornecer P;

O Biofertil não alterou o desenvolvimento inicial das plantas de milho pelo efeito na solubilização de fosfatos e dessorção de P das partículas do solo. Houve um pequeno estímulo ao crescimento das plantas em condições de suprimento adequado de P aos 12 DAE.

## 7 LITERATURA CITADA

ABERATHNA, A. A. A. U.; HERATH, H. M. P. D.; SENANAYAKE, G.; SENEVIRATNE, G.; ABEYSEKARA, S. W. Increasing the Bioavailability of Phosphate by Using Microorganisms. **International Journal of Agronomy**, v. 2022, p. 1–17, 2022.

ADESEMOYE, A. O.; TORBERT, H. A.; KLOEPPER, J. W. Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. **Microbial Ecology**, v. 58, n. 4, p. 921–929, nov. 2009.

ALOO, B. N.; MAKUMBA, B. A.; MBEGA, E. R. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, n. 2, p. 571–586, 16 set. 2022.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo**, v. 25, p. 27–33, 2000.

ANJUM, S. A.; XIE, X.; WANG, L.; SALEEM, M. F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 4 maio 2011.

BAIS, H. P.; WEIR, T. L.; PERRY, L. G.; GILROY, S.; VIVANCO, J. M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, n. 1, p. 233–266, 1 jun. 2006.

BAKER, N. R. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. 1, p. 89–113, 1 jun. 2008.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, J. P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). **Plant and Soil**, v. 378, n. 1–2, p. 1–33, 19 maio 2014.

BINI, D.; LOPEZ, M. V. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba, SP: ESALQ, 2016.

BRASIL. **Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022**. Institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/D10991.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10991.htm). Acesso em: 20 ago. 2025.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant and Soil**, v. 383, n. 1–2, p. 3–41, 8 out. 2014.

CARSTENSEN, A.; HERDEAN, A.; SCHMIDT, S. B.; SHARMA, A.; SPETEA, C.; PRIBIL, M.; HUSTED, S. The Impacts of Phosphorus Deficiency on the Photosynthetic Electron Transport Chain. **Plant Physiology**, v. 177, n. 1, p. 271–284, 1 maio 2018.

CHEN, J.; ZHAO, G.; WEI, Y.; DONG, Y.; XIE, B.; ZHANG, E. Isolation and screening of multifunctional phosphate solubilizing bacteria and its growth-promoting effect on Chinese fir seedlings. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 9081, 27 abr. 2021.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. In: SPARKS, D. L. (Org.). **Advances in Agronomy**. Alabama: Academic Press, 2009. v. 102. p. 267–322.

CHOUYIA, F. E.; VENTORINO, V.; PEPE, O. Diversity, mechanisms and beneficial features of phosphate-solubilizing *Streptomyces* in sustainable agriculture: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1035358, 6 dez. 2022.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **Dependência do agronegócio por fertilizantes importados**. Brasília, DF, 2023.

CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A.; SILVA, A. F.; SILVA, D. D.; MACHADO, J. R. A.; COTA, L. V.; COSTA, R. V.; MENDES, S. M. **Milho - Caracterização e Desafios Tecnológicos**. Brasília, DF: [s.n.], 2020. (SÉRIE DESAFIOS DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO). p. 1–45.

DAKORA, F. D.; PHILLIPS, D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. **Plant and Soil**, v. 245, n. 1, p. 35-47, ago. 2002.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.

FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**. Porto Alegre, 2008. 33 p.

FERREIRA, L. H. G.; GOMES, A. S.; SILVEIRA, C. A. P. **Fosfatos Naturais na Adubação de Sistema de Culturas de Verão com Ênfase no Arroz Irrigado**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2009.

FIERER, N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. **Nature Reviews Microbiology**, v. 15, n. 10, p. 579–590, 21 out. 2017.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; PANDOLFO, C. M.; VEIGA, M.; FLORES, A. F. C.; LIMA, M. A. S.; GIROTTO, E.; COPETTI, A. C. C. Establishing environmental soil phosphorus thresholds to decrease the risk of losses to water in soils from Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. 1–14, 17 ago. 2020.

GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**, v. 990, n. 1, p. 87–92, jan. 1989.

GHIMIREY, V.; PANDEY, S.; SHARMA, S.; POUDEL, S.; BHATTARAI, S.; POUDEL, A.; POUDEL, S. Biofertilizers: A sustainable strategy for enhancing physical, chemical, and biological properties of soil. **Innovations in Agriculture**, v. 7, p. 1–11, 23 out. 2024.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. The importance of early season phosphorus nutrition. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 81, n. 2, p. 211–224, 1 abr. 2001.

HASSAN, S.; MATHESIUS, U. The role of flavonoids in root-rhizosphere signalling: opportunities and challenges for improving plant-microbe interactions. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 9, p. 3429–3444, 1 maio 2012.

JONES, H. G. Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. In: **ADVANCES IN BOTANICAL RESEARCH**. Dundee: Academic Press, 2004. v. 41. p. 107–163.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. New York: Springer, 2008.

LIMA, P. H.; GOMES, A. C. Avaliação da solubilidade de fosfatos naturais em diferentes extratores ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 1, p. 1–15, 2018.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 13, p. 4671–4712, ago. 2012.

MAGURRAN, A. E. **Measuring biological diversity**. Oxford: Blackwell Publishing, 2004.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659–668, abr. 2000.

NOSHEEN, S.; AJMAL, I.; SONG, Y. Microbes as Biofertilizers, a Potential Approach for Sustainable Crop Production. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 1868, 9 fev. 2021.

OLIVEIRA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; LANA, U. G. P.; SANTOS, F. C.; MATRANGOLO, W. J. R.; ABREU, C. S.; SILVA, V. L.; OLIVEIRA, M. C.; NODA, R. W.; GOMES, P. H. F.; VASCO JUNIOR, R.; ALVES, V. M. C. **Viabilidade Técnica e Econômica do Biomaphos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas Culturas de Milho e Soja**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2020.

PAVINATO, P. S.; ROCHA, G. C.; CHERUBIN, M. R.; HARRIS, I.; JONES, D. L.; WITHERS, P. J. A. Map of total phosphorus content in native soils of Brazil. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 6, p. 1–5, 2021.

PILONETO, G. L. **Fertilizantes orgânicos, minerais e remineralizadores do solo no sistema de plantio direto orgânico de grãos**. 2022. 33 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2022.

R CORE TEAM. **R a language and environment for statistical computing: reference index**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2008.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, n. 1, p. 665–693, jun. 1999.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 453–466, jun. 2006.

RICHARDSON, A. E. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. **Functional Plant Biology**, v. 28, n. 9, p. 897–906, 2001.

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, abr. 2008.

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**, v. 2, n. 1, p. 587–600, 31 dez. 2013.

SILVA, L. I.; SOUZA, R. C.; ALMEIDA, J. R. G.; RAMÍREZ, I. M.; OLIVEIRA, J. T. C.; MELO, J. G.; NASCIMENTO, T. G.; GRILLO, L. A. M.; CORREIA, M. T. S.; SILVA, M. V. Phosphorus-Solubilizing Microorganisms: A Key to Sustainable Agriculture. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 462–480, 15 fev. 2023.

SILVA, O. M. C.; SILVA, A. G.; SANTOS, A. C.; SOUZA, J. T. R.; SOUSA, J. T. R.; FARIAS, S. C. C.; SILVA, R. R.; LIMA, A. K. O.; SILVA, R. T. L. Adubação fosfatada no crescimento inicial de sete espécies florestais nativas destinadas à recuperação de uma área degradada. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 371–394, 25 mar. 2022.

SULIEMAN, S.; MÜHLING, K. H. Utilization of soil organic phosphorus as a strategic approach for sustainable agriculture. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 184, n. 3, p. 311–319, 8 jun. 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Plant Physiology and Development**. 6. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2015.

VELOSO, C. A. C.; FRANZINI, V. I.; SILVA, A. R.; SILVA, A. K. S. **Produção de Grãos de Milho sob Manejo da Adubação Fosfatada em Latossolo Amarelo Distrófico no Oeste Paraense**. Belém, PR: Embrapa Amazônia Oriental, 2016.

WANG, C.; ZHAO, D.; QI, G.; MENG, Z.; SUI, X.; WANG, J.; LIU, H.; ZHANG, Z.; LAI, C.; ZHANG, C.; FANG, X. Phosphorus solubilizing microorganisms: potential promoters of agricultural and environmental engineering. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1181078, 12 maio 2023.

WENDIMU, A.; YOSEPH, T.; AYALEW, T. Ditching Phosphatic Fertilizers for Phosphate-Solubilizing Biofertilizers: A Step towards Sustainable Agriculture and Environmental Health. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1713, 16 jan. 2023.

ZAMBROSI, F. C. B.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; CANTARELLA, H.; LANDELL, M. G. A. Sugarcane performance under phosphorus deficiency: physiological responses and genotypic variation. **Plant and Soil**, v. 386, n. 1–2, p. 273–283, 17 jan. 2015.