

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIA AGRONÔMICAS
DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA

VICTOR HUGO ARAUJO BONDUKI

INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DO SOLO NO CULTIVO DE FEIJÃO
COMUM INOCULADO COM BIOMAPHOS®

BOTUCATU

2026

VICTOR HUGO ARAUJO BONDUKI

INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DO SOLO NO CULTIVO DE FEIJÃO COMUM
INOCULADO COM BIOMAPHOS®

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” (UNESP), no Departamento
de Agricultura, UNESP, Campus de Botucatu

Supervisor(a): Prof. Dr. Marcelo de Almeida
Silva

Co-supevisora: Dra. Rosemary Marques De
Almeida Bertani (APTA)

CNPq – Processo 406081/2022-0

BOTUCATU

2026

RESUMO

A importância da integração de tecnologias potenciais e sustentáveis quanto ao uso eficiente do P são necessárias para darem suporte ao produtor no manejo eficiente de fertilizantes fosfatados no cultivo de grãos, como também, reduzir a dependência destes e os custos de condução das áreas produtivas. Uma dessas tecnologias relacionadas ao manejo do solo é o BiomaPhos® e foi desenvolvida pela Embrapa Milho e Soja. Essa tecnologia necessita de estudos e validação em diferentes condições edafoclimáticas, e culturas, dentre elas a do feijoeiro-comum, por ser uma importante cultura geradora de emprego e renda, além de compor a matriz alimentar do País e das famílias brasileiras. Objetiva-se avaliar os indicadores microbiológicos do solo no cultivo do feijão-comum a partir do uso do BiomaPhos® nas condições edafoclimáticas do estado de São Paulo. Para isso, estão previstas atividades relacionadas à gestão do projeto e outras atividades técnicas, referentes à condução de experimentos tanto em casa de vegetação e campo, como também ensaios de validação pela rede de parceiros, formada por profissionais especializados, integrantes da equipe deste projeto, nas diferentes áreas da pesquisa. Para entender como o BiomaPhos® aumenta a produtividade de grãos e afeta a qualidade do solo, respostas biológicas e atividades enzimáticas do solo e outros parâmetros, como parâmetros fotossintéticos, eficiência agrônômica de P, análises de fracionamento de P no solo e P remanescente serão integrados e analisados usando-se o modelo Generalized Joint Attribute Model. Os resultados obtidos permitirão propor um processo agropecuário com intuito de melhorar a eficiência do uso de P com microrganismos solubilizadores, buscando-se reduzir o uso de fertilizantes de origem não renovável por insumos de base biológica, bem como a elaboração de produtos (artigo, capítulos de livros e resumos).

Palavras-chave: *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Phaseolus vulgaris* L., qualidade do solo, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de feijão (*Phaseolus vulgaris*), essa leguminosa é um dos pilares do agronegócio, pois é cultivada em toda extensão territorial, em que 67% da produção total é originada por meio agricultura familiar (Quinteiro *et al.*, 2018). Os estados brasileiros, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso, Goiás, Bahia e São Paulo estão no *ranking* dos principais produtores de feijão, respondendo por quase 75% da produção no país (Deral, 2022). Dentre estes, São Paulo responde por 24% da produção da região sudeste do país, com um total de 173,3 mil toneladas do grão, em uma área de 82,6 mil hectares (FAO, 2022).

Feijão-carioca, feijão-preto, feijão-de-corda, feijão guandu, feijão de cores (branco, vermelho e roxo) são as variedades comerciais brasileiras de maior destaque, sendo o feijão comum, o mais cultivado e que representa cerca de 85% da área plantada (Cna, 2022).

Entre as razões para o sucesso do estabelecimento do feijão-comum no Brasil, a principal é o valor nutricional, devido ao alto teor de proteínas, fibras alimentares, carboidratos complexos, vitaminas, minerais e fitoquímicos, os quais, possuem função protetora contra diversas disfunções biológicas (Hayat *et al.*, 2014; Messina *et al.*, 2014). Bem como, o feijão-comum compor a base da alimentação brasileira juntamente com o arroz (*Oryza sativa*) (Barbosa, 2007).

No âmbito da produção vegetal, o feijoeiro é uma cultura de ciclo curto (75 a 90 dias), cultivada em três épocas de semeadura (úmida, seca e inverno) em diferentes níveis tecnológicos, amplamente utilizada em rotações de cultura e hospeda rizóbios responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio (N) (Reinprecht *et al.*, 2020).

Por outro lado, o feijão tem baixo potencial de fixação de N em comparação com outras leguminosas acarretando a complementação com adubos nitrogenados (Uebersax *et al.*, 2023). Essa complementação resulta em atraso na maturidade, perda da qualidade das sementes e crescimento vegetativo acima do ideal, o que pode resultar em um dossel mais denso e ocorrência do mofo branco causado pelo patógeno *Sclerotinia sclerotiorum* (Uebersax *et al.*, 2023).

Além do N, o fósforo (P) é o segundo nutriente mais requerido para o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (Santos *et al.*, 2019). Este desempenha papel singular em vias metabólicas, como absorção de nutrientes, oxidação biológica e metabolismo energético (Uebersax *et al.*, 2023). Muito embora, do total do P aplicado ao solo, via

adubação, a planta aproveita cerca de 15 a 25%, devido a limitação desse nutriente por meio da fixação, a qual é regulada conforme o pH do solo (Johan *et al.*, 2021).

Em solos ácidos, a predominância de óxidos de alumínio (Al) e ferro (Fe) nas formas cristalina e amorfa reduzem a disponibilidade do P inorgânico no solo, porque o fixam em superfícies carregadas positivamente e formam precipitados insolúveis de Al e Fe (Johan *et al.*, 2021). Solos alcalinos, o P reage com o cálcio (Ca) formando fosfatos de cálcio pouco solúveis. Diante disso, apenas uma pequena fração do P do solo permanece na solução e é disponível a absorção das plantas, exigindo-se maior quantidade de fertilizantes químicos fosfatados (Johan *et al.*, 2021), os quais, são importados, gerando-se elevados custos durante o ciclo produtivo.

Diante de tais condições, a baixa disponibilidade de P no solo reduz a produção do feijoeiro em 50 a 70% da área cultivada (Keller *et al.*, 2020), bem como, afeta a expansão foliar, acúmulo de matéria seca, e fixação biológica de N (Zucarelli *et al.*, 2014).

Na tentativa de solucionar este gargalo, bactérias e fungos solubilizadores de fosfato são utilizados na conversão do P da forma indisponível para a disponível. Cepas bacterianas como *Acinetobacter*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Pantoea* e *Sinorhizobium* (Babalola & Glick, 2012; Raj *et al.*, 2014; Istina *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2019) e hifas de fungos dos gêneros *Penicillium*, *Sclerotium* e *Aspergillus* (Kalayu *et al.*, 2019) são citados na literatura como solubilizadores de fosfato.

O mecanismo de atuação desses microrganismos é pela criação de ácidos orgânicos (ácido fórmico, acético, propiônico, láctico, glicólico, fumárico e succínico) ou ácidos inorgânicos (ácido sulfúrico, nítrico e carbônico) para dissolver fosfatos (Kalayu *et al.*, 2019). Bem como, aumentam o volume de solo explorado pelas raízes (Rhodes & Gerdemann, 1975), sendo capazes de absorver e translocar para a planta íons fosfato localizados distantes, além da área de ação dos pêlos radiculares (Clarkson & Hanson, 1980).

Além disso, outras tecnologias são desenvolvidas, tal como a formulação de bioinoculantes de baixo custo aplicados em sementes para promover o crescimento de plantas e reduzir a dependência de fertilizantes fosfatados importados (Prabhu *et al.*, 2019). O grupo de microbiologia da Embrapa Milho e Sorgo desenvolveu um produto biológico conhecido como BiomaPhos®, o qual, é um inoculante biológico líquido, à base de bactérias benéficas, constituído pelas cepas BRM 119 (*B. megaterium*) e BRM 2084 (*B. subtilis*), podendo ser utilizado via tratamento de sementes ou aplicado diretamente no sulco de semeadura.

B. megaterium solubiliza fosfatos de cálcio e de rocha e produzir fosfatase, enquanto *B. subtilis* solubiliza fosfato de cálcio e ferro, apresenta alta produção de ácido glucônico e enzima fitase (Abreu *et al.*, 2017; Oliveira Paiva *et al.*, 2020; Velloso *et al.*, 2020). Bem como, contribuem na produção de AIA, sideróforos, exopolissacarídeos e formação de biofilme que estimulam o aumento da superfície radicular, especialmente de raízes mais finas (Sousa *et al.*, 2021; Velloso *et al.*, 2020).

Na literatura, resultados positivos foram apresentados na produção e redução dos custos de manutenção com o BiomaPhos® nas culturas da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), milho (*Zea mays*) e soja (*Glycine max*) (Oliveira *et al.*, 2020). Porém, ainda faltam pesquisas para consolidar os benefícios desse bioinoculante na produção e custo benefício em outras culturas, como por exemplo, o feijão-comum; sua aplicabilidade em condições edafoclimáticas ainda não estudadas; e os impactos na qualidade do solo (Paiva *et al.*, 2020; 2021), a qual, é avaliada pelos indicadores microbiológicos do solo (Araújo & Monteiro, 2007).

2. OBJETIVOS

O objetivo do projeto foi avaliar os indicadores microbiológicos em solo cultivado com feijão-carioca e com uso do BiomaPhos®, em condições edafoclimáticas do estado de São Paulo. Para isso foram previstos os seguintes objetivos específicos:

- Levantar os principais sistemas de produção de feijão-comum junto às unidades produtivas, bem como mensurar a magnitude do risco climático;
- Determinar o impacto do BiomaPhos® combinado ou não com fixadores de nitrogênio (*Rhizobium* sp. + *Azospirillum*), em diferentes solos e concentrações de fertilizante fosfatado na comunidade microbiana ativa do solo e na produtividade de feijão (Modelo GJAM);
- Entender como o solubilizador avaliado afeta a produtividade de grãos e qualidade do solo, por meio das respostas biológicas e atividades enzimáticas (Modelo GJAM);
- Validar o uso do BiomaPhos® em área de produtores de feijão-comum no estado de São Paulo;
- Quantificar economicamente o custo-benefício da aplicação de solubilizador de fosfato na cultura do feijão-comum.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto foi desenvolvido em experimentos conduzidos em ambiente protegido (casa de vegetação) e em campo, as sementes foram inoculadas com o Biomaphos® em diferentes proporções. Assim, foram realizadas as seguintes atividades durante a vigência do projeto:

3.1 Ensaio em ambiente protegido

O experimento foi realizado na URPD de Bauru da APTA Regional/Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo. Inicialmente foram coletados 2 tipos de solo (com alto teor de P e com baixo teor de P) e o experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial duplo com 12 tratamentos (3 doses de fertilizante fosfatado X 4 doses do BiomaPhos®) com 4 repetições, totalizando-se 48 parcelas, para cada tipo de solo.

O solo foi coletado da camada de 0-20 cm em duas áreas (com diferentes teores de P) previamente determinada para a realização do experimento de campo, e foi posteriormente adicionado em vasos com capacidade de 5 kg de solo. O solo com alto teor de P apresentou textura argilosa, já aquele com baixo teor de P foi predominante a textura arenosa. O solo com alto teor (S1) foi aquele com valores de $68 \text{ mg P}_{\text{resina}} \text{ dm}^{-3}$ referente ao primeiro experimento e $84 \text{ mg P}_{\text{resina}} \text{ dm}^{-3}$ referente ao segundo experimento. O solo com baixo teor (S2) apresentou valores de 13 e $8 \text{ mg P}_{\text{resina}} \text{ dm}^{-3}$, referentes ao primeiro e segundo experimento, respectivamente. A interpretação e correção dos atributos químicos assim como a determinação das quantidades de P a serem aplicadas juntamente com os demais nutrientes essenciais, seguirão as recomendações para a cultura (Raij *et al.*, 1996). Os tratamentos foram:

- **T1:** 0 mL/ha de BiomaPhos® + 0% recomendação de P para a cultura do feijão (RPF) do Boletim IAC;
- **T2:** 0 mL/ha de BiomaPhos® + 50% da RPF;
- **T3:** 0 mL/ha de BiomaPhos® + 100% da RPF;
- **T4:** 100 mL/ha de BiomaPhos® + 0% da RPF;
- **T5:** 100 mL/ha de BiomaPhos® + 50% da RPF;
- **T6:** 100 mL/ha de BiomaPhos® + 100% da RPF;
- **T7:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + 0% da RPF;
- **T8:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + 50% da RPF;
- **T9:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + 100% da RPF;

- **T10:** 300 mL/ha de BiomaPhos® + 0% da RPF;
- **T11:** 300 mL/ha de BiomaPhos® + 50% da RPF;
- **T12:** 300 mL/ha de BiomaPhos® + 100% da RPF.

3.2 Experimento em campo

O experimento foi conduzido em campo durante dois ciclos, no primeiro semestre de 2024 e no segundo semestre de 2025, em propriedade comercial rural, localizada no município de Pardinho, SP e Paranapanema, SP, respectivamente. Antes da instalação dos experimentos foram coletadas amostras de solo para avaliação dos atributos físicos (na camada de 0-20 cm) e químicos do solo (nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm). Na etapa de florescimento dos ciclos de cultivos também foram coletadas amostras para avaliação dos atributos químicos do solo (na camada de 0-20 cm), de cada parcela experimental. Nas análises físicas foram avaliadas as concentrações de Areia, Silte e Argila, já nas análises químicas foram avaliados os teores de M.O., pH, H+Al, Al³⁺, SB, CTC, V%, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme descrito por Raij *et al.* (2001).

Em ambos ciclos, os experimentos foram montados em DBC, em esquema fatorial duplo com 9 tratamentos (3 doses de fertilizante fosfatado X 3 doses do BiomaPhos® e fixadores de nitrogênio) e 4 repetições, totalizando com 40 parcelas conforme os tratamentos descritos a seguir:

- **T1:** Testemunha: 0 mL/ha BiomaPhos® e 0% da recomendação de P para a cultura do feijão (RPF) do Boletim IAC;
- **T2:** 0 mL/ha de BiomaPhos® + 50% da RPF;
- **T3:** 0 mL/ha de BiomaPhos® + 100% da RPF;
- **T4:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + 0% da RPF;
- **T5:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + 50% da RPF;
- **T6:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + 100% da RPF;
- **T7:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + *Rhizobium tropici* + *Azospirillum* sp. + 0% da RPF;
- **T8:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + *Rhizobium tropici* + *Azospirillum* sp. + 50% da RPF;
- **T9:** 200 mL/ha de BiomaPhos® + *Rhizobium tropici* + *Azospirillum* sp. + 100% da RPF.

3.3 Características a serem avaliadas em ambos os experimentos:

Apesar do foco do projeto ser os indicadores microbiológicos, análises complementares serão realizadas com o intuito de complementar os resultados obtidos.

3.3.1 Avaliações biométricas e componentes de produção

Durante os ciclos de cultivo em casa de vegetação e em campo, foram coletadas medidas da altura da planta (em cm) e do diâmetro do caule (em mm), além da quantidade das folhas trifoliadas. A determinação da altura das plantas foi feita a partir do nível solo até o último trifólio. O diâmetro do caule foi medido com paquímetro digital (MeterMall, 150 mm e leitura de 0,1 mm, Marysville, OH, EUA). O número de folhas trifoliadas foi contado a partir das folhas desenvolvidas, iniciando pela base da planta até a última. Esses parâmetros foram medidos até o estágio florescimento.

Quando foi atingido o estágio de colheita, final do ciclo, plantas foram coletadas para a realização das avaliações posteriores. O sistema radicular foi lavado em água corrente sobre peneira para remover completamente o solo, deixando apenas as raízes para a quantificação de nódulos. As raízes ficaram armazenadas em solução de álcool 50% durante o período de contagem de nódulos, ao final dessa etapa as raízes foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação de ar (65 °C por 72 h) até atingir massa constante. Por fim, foram pesadas em balança digital para obtenção da massa da matéria seca da raiz. A parte aérea foi segmentada em folhas e caule, vagens e grãos, e pesadas separadamente e secas em estufa (65 °C por 72 h) até atingir massa constante para obtenção da massa da matéria seca da parte aérea e matéria seca dos grãos. Foram determinados ainda os componentes de produtividade do feijoeiro, como número de vagens e número de grãos por vagem, além da determinação do teor de P nos grãos. Após 40 dias da semeadura foi determinado a estimativa do conteúdo de clorofila utilizando um clorofilômetro portátil (SPAD-502, Minolta Corporation, Ramsey, NJ, EUA), o índice SPAD foi calculado a partir da média de três leituras por planta (Cassetari et al., 2015). Além disso, foi calculada a eficiência agrônômica de P considerando a produtividade do feijoeiro com a fonte de fosfato e o BiomaPhos® (Borges et al., 2019).

3.3.2 Avaliação de trocas gasosas

Após 40 dias da semeadura foi determinado a estimativa do conteúdo de clorofila utilizando um clorofilômetro portátil (SPAD-502, Minolta Corporation, Ramsey, NJ, EUA), o índice SPAD foi calculado a partir da média de três leituras por planta (Cassetari et al., 2015). No mesmo dia foram avaliadas as trocas gasosas e atividade do aparelho fotossintético, o aparelho utilizado foi um analisador de troca de gases por infravermelho

(IRGA, LI-COR Biosciences INC., LI-6400xt, Lincoln, NE EUA), sob radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de 1500 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na câmara foliar, considerando a concentração de CO_2 , temperatura e umidade do ambiente. As variáveis coletadas foram taxa de assimilação líquida de CO_2 ($A = \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($g_s = \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e transpiração ($E = \text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A eficiência de uso da água ($WUE = \text{mmol CO}_2 \text{ H}_2\text{O}^{-1}$) foi calculada pela razão da assimilação líquida de CO_2 (A) pela transpiração (E), e a eficiência intrínseca do uso da água ($iWUE$) será calculada pela razão da assimilação líquida de CO_2 (A) pela condutância estomática (g_s).

3.3.3 Análises de fracionamento de P

O fracionamento de P foi realizado pelo método de Hedley com modificações (Hedley *et al.*, 1982; Gatiboni & Condron, 1985), o qual consiste em extrair sequencialmente diferentes formas de P de acordo com sua solubilidade e disponibilidade às plantas. Inicialmente foram extraídas as frações mais lábeis, utilizando resina de troca aniônica, seguida pela extração com bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (NaHCO_3) com pH corrigido para 8,5 (frações Pi NaHCO_3 e Po NaHCO_3). As frações moderadamente lábeis, como o P adsorvido em Al e Fe amorfo (P-Fe / P-Al) foram determinadas usando solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L^{-1} (frações Pi NaOH 0,1 mol L^{-1} e Po NaOH 0,1 mol L^{-1}). Em seguida as amostras de solo receberam solução de ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (HCl) que extraiu P ligado a cálcio (P-Ca). Ao final das extrações, o solo remanescente foi seco em estufa e submetido à digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$ para avaliação do P residual (Brookes & Powson, 1981).

O P inorgânico dos extratos alcalinos de NaHCO_3 e NaOH foi determinado pelo método de Dick & Tabatabai (1977). Nos extratos alcalinos, o P total foi determinado por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico em autoclave, seguindo metodologia descrita em USEPA, (1971). O teor de P orgânico (Po) foi determinado pela diferença entre os teores de P total e P inorgânico. O teor de P inorgânico de cada extrato foi determinado pelo método colorimétrico de Murphy & Riley (1962).

3.3.4 Avaliação da atividade enzimática do solo

As amostras de solo coletadas nas áreas definidas pelos tratamentos foram peneiradas em malha de 2 mm, e armazenadas em geladeira antes da realização de cada análise. Todas as leituras de absorbância foram realizadas em triplicada, em espectrofotômetro UV-Vis (Shimadzu UV-2700, Kyoto, Japan) e com cubetas de quartzo. Foram determinadas no solo a respiração basal, carbono e nitrogênio da biomassa

microbiana e enzimas relacionadas aos ciclos do carbono (betaglicosidase e desidrogenase), fósforo (fosfatase), enxofre (arilsulfatase), nitrogênio (urease) e Hidrolases do Diacetato de Fluoresceína. As análises foram realizadas de acordo com as metodologias a seguir.

- Análise da Respiração Basal do Solo (RBS), avaliada de acordo com metodologia adaptada de Silva *et al.* (1965):

A RBS foi determinada utilizando 100 g de solo seco, umedecido até 60 % da capacidade de campo (CC) em frascos de vidro hermeticamente fechados. No interior de cada frasco, foi colocado copos plásticos (50 mL) contendo 10 mL de NaOH 0,5 M, com o objetivo de capturar o CO₂ liberado pela atividade microbiana ao longo da incubação. Ao final do período de incubação (21 dias), a quantidade de CO₂ absorvida pela solução de NaOH foi determinada por titulação com solução de HCl 0,1 M, utilizando fenolftaleína como indicador. Os resultados foram expressos em µg de C-CO₂ g⁻¹ solo dia⁻¹.

- O Carbono (CBM) e o Nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) foram quantificados de acordo com a metodologia de Ferreira *et al.* (1999) e Joergensen *et al.* 1990:

Após a incubação para RBS, 20 g do solo foi separado para a extração da biomassa microbiana utilizando solução de K₂SO₄ (0,5 M), e posteriormente submetido à digestão ácida com ácido sulfúrico e dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇, 11mol/L). O CBM foi determinado com base na oxidação do carbono orgânico a CO₂, sendo os elétrons direcionados para a redução do íon dicromato (Cr₂O₇²⁻), onde o cromo vai de Cr⁶⁺ a Cr³⁺, assim a quantidade de dicromato reduzido é proporcional a quantidade de carbono oxidado. A etapa seguinte foi a adição de difenilcarbazida, reagente colorimétrico e sensível ao Cr⁶⁺, essa reação é quantificada por espectrofotometria a 540 nm e os resultados expressos em µg C g⁻¹ solo. Assim a concentração de carbono orgânico da amostra é medida indiretamente pelo dicromato remanescente que não reagiu.

Para a determinação do NBM, o mesmo extrato utilizado na análise do CBM foi utilizado. Em meio aquecido o extrato reagiu com solução de ninhidrina (2%), formando complexo colorido. A absorbância foi medida em espectrofotômetro a 570 nm e os resultados expressos em µg N g⁻¹ solo.

- A atividade da enzima Desidrogenase do solo foi determinada pelo método de

Mersi & Schinner (1991):

Do mesmo solo utilizado na incubação para RBS, 1 g foi separado em tubos de vidro e adicionado 1,5 mL de tampão TRIS. Após a agitação dos tubos foi adicionada a solução de cloreto de iodonitrotetrazólio (INT). O a reação seguiu para incubação e após 5 h, a 40 °C foi adicionado solução extratora (álcool + dimetilformamida). As amostras foram enviadas novamente para incubação por 20 minutos a 40 °C. Após atingir temperatura ambiente, as amostras foram centrifugadas, a quantificação de Violeta de Formazana de Iodonitrotetrazólio (INFT) no sobrenadante foi determinado em espectrofotômetro a 490 nm e a atividade da enzima foi expressa em $\mu\text{g INFT g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$.

- Atividade das enzimas Arilsulfatase, Betaglicosidase e Fosfatase Ácida foram determinadas segundo metodologia adaptada por Popova *et al.* (2010), proposta pelo ‘Protocolo do Setor de Microbiologia do Solo (IAC)’ adaptado de Alef & Nannipieri (1995):

A atividade das enzimas foi determinada no mesmo procedimento analítico, a partir da incubação em câmara agitadora de 1 g solo em 60 mL de água, por 30 min, a 37 °C e 1300 rpm. Ao final da incubação, uma alíquota da solução com solo foi adicionada, em triplicata, em microtubos contendo: (A) substrato p-nitrofenil-sulfato de potássio, dissolvido em tampão acetato de sódio (0,5 M) e pH 5,8, quando o intuito foi analisar a enzima arilsulfatase; (B) substrato p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo, dissolvido em tampão MUB I e pH 6,0, quando o intuito foi analisar a enzima betaglicosidase; (C) substrato p-nitrofenilfosfato dissolvido em tampão MUB II e pH 6,5, quando o intuito foi analisar a enzima fosfatase ácida. Os microtubos foram incubados novamente por 1 h, a 37 °C e 1300 rpm. Após essa incubação foi adicionado NaOH (0,5 M) e as amostras centrifugadas. A concentração de p-nitrofenol (PNF) presente no sobrenadante foi determinada em espectrofotômetro a 415 nm e os resultados expressos em $\mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$.

- A atividade da enzima Urease foi determinada segundo Cordero *et al.* (2019):

Para essa análise foi adicionado tampão acetato de sódio (50 mM pH 5,0) em 4 g de solo e posteriormente agitado. Em seguida, uma alíquota de cada amostra foi transferida para microtubos contendo solução de ureia (80 mM) e foram incubados por 2 h a 37 °C sob agitação de 1300 rpm. Após a incubação, foi adicionado KCl (2M) em todos os microtubos, e novamente, foram incubados por mais 30 minutos. As amostras foram

centrifugadas e a quantificação do amônio, extraído pelo processo, no sobrenadante foi determinado em espectrofotômetro a 650 nm. A atividade da enzima foi expressa em $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ de solo seco h}^{-1}$.

- A atividade da FDA foi determinada segundo Grenn *et al.* (2006):

Foi adicionado 5 mL de tampão KH_2PO_4 pH 7,5 em tubos de vidro contendo 1 g de solo. Após agitação dos tubos, foi adicionado solução substrato de FDA (Diacetato de fluoresceína + acetona) e agitados por novamente. Os tubos foram incubados em banho-maria por 1 h a 30 °C. Após centrifugação, a quantificação de FDA no sobrenadante das amostras foi realizada pela leitura em espectrofotômetro a 490 nm e a atividade expressa em $\mu\text{g FDA g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando significativos as médias foram comparadas e agrupadas pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. Os *softwares* R e AgroEstat (AgroEstat, versão 2015, Jaboticabal, SP, Brasil) foram utilizados para as análises estatísticas.

3.3.5 Validação do uso do Biomaphos®

Para avaliar as respostas do uso do solubilizador de fosfato em áreas de produção comercial de feijão comum, experimentos foram instalados em quatro propriedades rurais localizadas nos municípios do estado de São Paulo. Em Angatuba o plantio foi realizado em 30 de julho de 2025 e a colheita no dia 19 de novembro de 2025. Em Pratânia o plantio foi realizado em 25 de julho de 2025 e colheita foi realizada em 13 de novembro de 2025. Em Paranapanema (Holambra II) o plantio foi realizado em 30/07/25 e colheita foi realizada em 26/11/2025. E em Pardinho.

Nos municípios de Angatuba, Pratânia e Paranapanema foi plantada a cultivar Dama. Foram avaliados dois tratamentos (Com e Sem o acréscimo do BiomaPhos® e manejo adotado pelo produtor), com 15 parcelas por tratamento. A dose utilizada foi de 200 mL/ha de BiomaPhos® aplicada nas sementes. Cada parcela era composta por 12 linhas de cultivo (6 m de largura), espaçadas de 0,5 m, e 7 m de comprimento, totalizando 42 m², sendo desconsiderado 1 m do início de cada parcela nas avaliações. A análise estatística utilizada foi o teste t de Student para determinar a diferença entre os tratamentos avaliados. Já no município de Pardinho, para obtenção da resposta do uso do solubilizador de fosfato foram considerados apenas os tratamentos sem e com a utilização do BiomaPhos® associado às porcentagens da adubação com P recomendada para a cultura no estado de SP. Cada parcela possuiu dimensão de 6 x 6 m, perfazendo uma área

de 36 m², com 12 fileiras em cada parcela, com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 0,1 m entre plantas, sendo 2 fileiras consideradas como bordaduras. A análise estatística utilizada foi o teste t de Student para determinar a diferença entre os tratamentos avaliados.

4. RESULTADOS

4.1 Respostas do feijoeiro-comum ao uso do Biomaphos®

4.1.1 Experimento de casa de vegetação

Atributos químicos do solo (Ciclos 1 e 2)

Nos dois ciclos experimentais, o pH do solo não apresentou efeito significativo das doses de P ou do uso de BiomaPhos®, tanto no solo 1 (S1) quanto no solo 2. No S1, os valores médios variaram entre 5,6 e 6,1, enquanto no S2 oscilaram entre 5,0 e 6,3, indicando que os tratamentos não promoveram alterações relevantes na acidez do solo e, portanto, não limitaram o desenvolvimento radicular ou a absorção de nutrientes.

O comportamento do P disponível contrastou entre os solos. No S1, o P disponível apresentou valores elevados desde o Ciclo 1 (55-65 mg dm⁻³), não respondendo às doses de P nem à aplicação de BiomaPhos®. Essa condição explica a ausência de resposta produtiva direta ao incremento da adubação fosfatada nesse ambiente. Em contraste, no S2, o P disponível foi significativamente influenciado pelas doses de P em ambos os ciclos, com incrementos de até 50% entre a menor e a maior dose, atingindo valores próximos a 17-25 mg dm⁻³ no florescimento do Ciclo 2, caracterizando o P como nutriente limitante nesse ambiente.

A matéria orgânica apresentou respostas distintas entre os solos. No S1, observaram-se interações significativas entre BiomaPhos® e doses de P, com valores variando de 30 a 40 g kg⁻¹. No S2, houve efeito do BiomaPhos® com incrementos de até 28% na matéria orgânica, sugerindo estímulo à atividade microbiana.

Com relação aos demais atributos químicos do solo, no S1, a maior saturação por bases, os teores adequados de Ca, Mg e K e a menor acidez potencial resultaram em menor atividade de Al³⁺ na solução do solo, reduzindo a fixação de P e favorecendo sua permanência em formas lábeis. Em contraste, no S2, caracterizado pela menor fertilidade, o P atuou como fator limitante, deixando menor margem para redução da dose de P.

Diagnose foliar, estado nutricional das plantas e SPAD (Ciclos 1 e 2)

No Ciclo 1, a diagnose foliar evidenciou a resposta ao estado nutricional das plantas quanto às doses de P e ao uso de BiomaPhos®. Os teores foliares de nitrogênio mantiveram-se dentro da faixa adequada em todos os tratamentos (22–26 g kg⁻¹), indicando que esse nutriente não foi fator limitante. O teor foliar de P respondeu significativamente às doses aplicadas, com maiores valores na dose correspondente à

100% da recomendação de P (P100), especialmente quando associada ao BiomaPhos® (300 mL ha⁻¹), atingindo 1,8–2,0 g kg⁻¹, enquanto nas doses reduzidas os valores variaram entre 1,3 e 1,5 g kg⁻¹, representando incrementos de 25–35%.

Os teores foliares de potássio variaram entre 28 e 34 g kg⁻¹, com tendência de maiores valores nas doses mais elevadas de P, enquanto cálcio, magnésio e enxofre permaneceram em faixas adequadas. De forma geral, a diagnose foliar do Ciclo 1 indicou que a combinação BiomaPhos® 300 mL ha⁻¹ + P100 promoveu o melhor equilíbrio nutricional.

No Ciclo 2, o comportamento nutricional das plantas foi fortemente dependente do tipo de solo. No S1, os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg e S permaneceram dentro das faixas adequadas em todos os tratamentos, sem efeitos significativos das doses de P ou do uso de BiomaPhos®. Os teores médios de P foliar variaram entre 1,45 e 1,80 g kg⁻¹, e os de K entre 29 e 34 g kg⁻¹, indicando que a redução da dose de P não comprometeu o estado nutricional das plantas nesse ambiente.

No S2, as doses de P influenciaram significativamente o estado nutricional das plantas. O teor foliar de P aumentou cerca de 25% na maior dose de P (1,25–1,30 g kg⁻¹), enquanto o teor foliar de K apresentou redução superior a 35% nas doses mais elevadas, sugerindo efeito de diluição ou competição iônica. Os teores de Ca e Mg aumentaram com o incremento da dose fosfatada (até 28% e 17%, respectivamente), enquanto o teor foliar de N apresentou comportamento inverso, com maiores valores na menor dose de P. Em ambos os solos, os teores de S permaneceram adequados.

Ao longo dos dois ciclos, os valores de SPAD evidenciaram respostas distintas entre os solos. No S1, os valores foram maiores nos tratamentos com BiomaPhos®, mesmo sob doses reduzidas de P. No S2, os valores de SPAD foram influenciados pelas doses de P nos estádios iniciais e intermediários de desenvolvimento das plantas, com incrementos superiores a 25% entre a menor e a maior dose.

Massa fresca, seca e nódulos da raiz (Ciclo 1)

Para massa fresca de raiz no S1, não houve efeito significativo dos fatores isolados nem da interação ($p > 0,05$), com média geral de 23,68 g. As médias variaram de 14,50 g (100 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100) a 30,90 g (300 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100), porém sem diferenças estatísticas pelo teste de Tukey. Em contraste, no S2, observou-se efeito significativo de Doses de P ($p = 0,0149$) e interação das doses de BiomaPhos® × Doses de P ($p = 0,0051$). A dose referente a P100 apresentou maior média (18,73 g), superando o

tratamento P0 e P50. O melhor tratamento foi 200 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100 (29,45 g), estatisticamente superior a 0 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100 e 100 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100, enquanto 200 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P0 (7,90 g) apresentaram-se entre os piores tratamentos. O desdobramento indicou que 200 mL ha⁻¹ BiomaPhos® respondeu ao incremento das doses de recomendação de P, evidenciando efeito sinérgico.

Para a massa seca de raiz, no S1, não houve diferenças significativas (média 4,06 g). Já no S2 houve efeito de BiomaPhos® (p=0,0434) e interação (p=0,0050). 300 mL ha⁻¹ BiomaPhos® apresentou maior média geral (2,39 g), diferindo de 100 mL ha⁻¹ BiomaPhos® (1,53 g). O maior valor foi obtido em 300 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100 (3,02 g), enquanto 200 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P0 (0,97 g) resultou em menor valor.

Quanto ao número de nódulos, no S1, a interação foi significativa (p=0,0329). O tratamento sem a aplicação de P e do BiomaPhos® apresentou maior nodulação (162 nódulos), superando 100 mL ha⁻¹ BiomaPhos®. Em P100, 300 mL ha⁻¹ BiomaPhos® destacou-se (136), diferindo do tratamento de 200 mL ha⁻¹ BiomaPhos® (76). No S2, houve efeito de Doses de P (p=0,0071) e interação (p=0,0485). A dose de P100 promoveu maior nodulação média (68), e o tratamento 200 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100 atingiu o maior valor (94), diferindo de 100 mL ha⁻¹ BiomaPhos® + P100 (34).

Em síntese, o S2 mostrou maior responsividade aos tratamentos, especialmente sob a dose de P100, que proporcionou a maior massa radicular e o maior número de nódulos quando associada às doses de 200 mL ha⁻¹ e 300 mL ha⁻¹ de BiomaPhos®. Os piores desempenhos concentraram-se nas combinações sem a aplicação de P e as doses de 100 mL ha⁻¹ e 200 mL ha⁻¹ de BiomaPhos®.

Componentes de rendimento e produtividade (Ciclos 1 e 2)

No Ciclo 1, conduzido em solo de maior fertilidade, a combinação de BiomaPhos® (300 mL ha⁻¹ + P100), apresentou o melhor desempenho agrônômico, com produção média de grãos variando de 28 a 32 g planta⁻¹, representando incrementos de 30–45% em relação à dose reduzida e até 60% em relação à testemunha sem adubação fosfatada. No S2, de menor fertilidade, a produtividade no Ciclo 1 foi influenciada apenas pela dose de P, com desempenho superior nos tratamentos com P100.

No Ciclo 2, no S1, a produtividade variou entre 10,3 e 14,9 g planta⁻¹, com superioridade dos tratamentos com BiomaPhos®, especialmente o BiomaPhos® (300 mL ha⁻¹), que apresentou médias até 30% superiores aos tratamentos testemunha e apenas P50. As doses de P não diferiram estatisticamente nesse solo, reforçando que a

produtividade foi mais influenciada pela utilização do BiomaPhos®. No S2, a produtividade foi influenciada pelas doses de P, com incrementos superiores a 100% entre a menor e a maior dose.

Conclui-se que de forma integrada, os resultados dos dois ciclos e dos dois solos demonstram que o BiomaPhos® permitiu reduzir a dose de fertilizante fosfatado, especialmente em solos de maior fertilidade, como o S1. Nesses ambientes, é viável reduzir a adubação mineral com P em até 50% quando associada ao BiomaPhos®, sem prejuízo ao estado nutricional, à fisiologia ou à produtividade das plantas. Em solos mais dependentes do P, como o S2, a redução da dose é possível de forma mais conservadora (20-30%), desde que associada ao manejo adequado.

4.1.2 Experimento de Campo - Primeiro Ciclo

A análise da granulometria do solo (Tabela 1.1) foi realizada no Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Os resultados indicaram que o solo apresenta textura argilosa.

Tabela 1.1. Composição granulométrica e textura do solo da área experimental

Prof. (cm)	Areia (%)			Argila (%)	Silte (%)	Textura do Solo
	Grossa	Fina	Total			
0 - 10	129	220	349	440	211	Argilosa
10 - 20	121	230	351	469	180	Argilosa

A análise para a caracterização química do solo foi realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo, do mesmo Departamento, sendo determinados os teores de matéria orgânica (MO), P, H+Al, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, B, Cu, Fe, Mn e Zn (Tabela 1.2), bem como os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%), conforme metodologia descrita por Raij et al. (2001).

Solo

No estágio de florescimento, foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20 cm para avaliação dos atributos químicos. Os resultados indicaram que o pH do solo não foi influenciado pelos tratamentos (Tabela 1.3), apresentando variação entre 5,87 e 6,00. A matéria orgânica do solo apresentou efeito isolado do tratamento com BiomaPhos®, com incremento de 12,4% no tratamento B200+Az+Rt e de 5,7% em B200, quando comparados ao controle. Os tratamentos não promoveram alterações significativas nos teores de P disponível, que permaneceram em faixa elevada, variando de 138,08 a 148,08 mg dm⁻³. O potássio apresentou efeito significativo do fator BiomaPhos, com maior teor observado no tratamento B200 (3,11 mmolc dm⁻³), sendo superior aos tratamentos B200+Az+Rt e controle. Os teores de Ca, Mg, H+Al, SB, CTC e V% não apresentaram diferenças significativas entre tratamentos. Entre os micronutrientes avaliados, apenas o boro apresentou efeito significativo dos tratamentos, com maior teor observado em B200+Az+Rt (0,45 mg dm⁻³) e menor no tratamento controle (B0) (0,34 mg dm⁻³). Por outro lado, os teores de Cu, Fe, Mn e Zn não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos.

Tabela 1.2. Caracterização química do solo da área experimental, na profundidade de 0-20 cm, antes da instalação do experimento

pH	M.O.	P _{resina}	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³	-----mmol _c /dm ³ -----						----- mg/dm ³ -----							
5,9	22	68	0	26	3,1	37	7	47	73	64	7	0,45	1,6	20	3,9	2,2
H+Al – Acidez potencial; SB – Soma de bases; CTC – Capacidade de troca de cátions; V% - Saturação de bases.																

Tabela 1.3. Resultados de análise química de solo (0-20 cm) em área de feijoeiro submetida a tratamentos com BiomaPhos® (B) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação) no solo.

BiomaPhos (mL ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K	Ca ----- mmolc dm ⁻³ -----	Mg	H+Al	SB	CTC	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
B0	5,87	37,75a ¹	148,08	2,24	51,17	13,25	26,58	66,58	93,17	70,42	0,34a	2,20	12,33	1,97	3,60
B200	6,00	39,92ab	138,67	3,11 b	51,00	12,17	23,75	66,25	90,08	73,42	0,41ab	2,18	12,50	1,78	3,67
B200+Az ²	5,99	43,42 b	138,08	2,29 a	50,00	12,83	23,42	65,00	88,42	73,25	0,45 b	2,29	13,00	1,93	3,52
B	0,50 ^{ns}	6,55**	0,55 ^{ns}	13,95**	0,06 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,48 ^{ns}	5,67**	0,76 ^{ns}	0,74 ^{ns}	1,71 ^{ns}	0,20 ^{ns}
P	0,09 ^{ns}	2,93 ^{ns}	1,72 ^{ns}	1,71 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,40 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,36 ^{ns}
BxP	0,26 ^{ns}	2,58 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,64 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,35 ^{ns}	2,51 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,55 ^{ns}	1,17 ^{ns}	0,31 ^{ns}
C.V. (%)	5,77	9,59	18,51	17,71	17,99	41,18	28,59	22,00	10,61	11,61	20,56	10,40	11,08	14,07	15,45

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Diagnose Foliar

Teor de N

No período de florescimento, também foi realizada a diagnose foliar para avaliação do estado nutricional das plantas. Observou-se interação significativa entre as doses de P e de BiomaPhos® para o teor foliar de N (Tabela 1.4). Na ausência de BiomaPhos®, a aplicação de P proporcionou aumento significativo do teor foliar de N, por outro lado com a aplicação de B200 e doses de P, o teor de N reduziu significativamente. Já a aplicação de B200+Az+Rt não apresentou diferença significativa entre as doses de P.

Considerando a aplicação de P, verificou-se que, na ausência de adubação fosfatada, não houve diferença significativa no teor de N entre os tratamentos B0, B200 e B200+Az+Rt. No entanto, quando o P foi aplicado nas doses de 50 e P100 em combinação com B200 ou B200+Az+Rt, o teor foliar de N apresentou redução significativa em comparação ao tratamento sem aplicação de Bioma.

Tabela 1.4. Teor de nitrogênio foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

Tratamentos	Bioma 0	Bioma 200	Bioma 200+Az+Rt ¹
P0	49,50 Ba ¹	50,75 Aa	48,75 Aa ²
P50	52,25 Aa	48,00 Bb	48,00 Ab
P100	52,25 Aa	47,50 Bb	46,25 Ab
Bioma		20,95**	
P		1,60 ^{ns}	
Bioma x P		6,31**	
C.V. (%)		2,89	

¹ Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

² Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

Teor de P

Observou-se interação significativa entre as doses de fósforo e de BiomaPhos® para o teor foliar de P (Tabela 1.5). Na ausência de BiomaPhos®, o incremento das doses de P promoveu aumento significativo no teor foliar, sem diferença significativa entre as doses de P50 e P100. Por outro lado, quando o BiomaPhos® foi aplicado na dose de 200 mL ha⁻¹ em associação à adubação fosfatada, verificou-se menor teor foliar de P. No tratamento B200+Az+Rt, não foram observadas diferenças significativas entre as doses de P.

Tabela 1.5. Teor de fósforo foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

Tratamentos	Bioma 0	Bioma 200	Bioma 200+Az+Rt ¹
-------------	---------	-----------	------------------------------

P0	3,22 Bb	3,58 Aa	3,28 Ab ²
P50	3,50 ABa	3,45 ABa	3,55 Aa
P100	3,60 Aa	3,25 Bb	3,45 Aab
Bioma		0,04 ^{ns}	
P		2,43 ^{ns}	
Bioma x P		5,56**	
C.V. (%)		4,59	

¹ Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

² Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

Teor de K

Não foi observada interação significativa entre as doses de BiomaPhos® e a adubação fosfatada para o teor foliar de potássio (Tabela 1.6). Verificou-se efeito isolado de BiomaPhos®, com aumento significativo no teor foliar de K em comparação ao tratamento controle. Entretanto, não houve diferença estatística entre os tratamentos B200 e B200+Az+Rt.

Tabela 1.6. Teor de potássio foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Potássio foliar
0	25,58 a ¹
200	27,92 b
200+Az+Rt ²	26,42 ab
Fósforo (P)	Potássio foliar
0	26,00 a
50	27,50 a
100	26,42 a
Bioma	3,71*
P	1,59 ^{ns}
Bioma x P	0,67 ^{ns}
C.V. (%)	7,99

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Teor de Ca

Não foi observada interação significativa entre os tratamentos de BiomaPhos® e a adubação fosfatada para o teor foliar de cálcio, sendo observados efeitos isolados da aplicação de BiomaPhos® e de fósforo (Tabela 1.7). O tratamento B200+Az+Rt aumentou significativamente o teor de Ca em relação ao controle e B200, enquanto não houve diferença significativa entre o controle e B200. Ao avaliar as doses de P, observou-se que o teor de Ca diminuiu na dose de P50.

Tabela 1.7. Teor de cálcio foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Cálcio foliar
0	13,42 a ¹
200	12,17 a
200+Az+Rt ²	15,42 b
Fósforo (P)	Cálcio foliar
0	14,50 a
50	13,08 b
100	13,42 ab
Bioma	16,85**
P	3,44*
Bioma x P	1,68 ^{ns}
C.V. (%)	10,12

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Teor de Mg

Observou-se interação significativa entre as doses de fósforo e BiomaPhos® para o teor foliar de Mg (Tabela 1.8). Considerando os tratamentos B200 e B200+Az+Rt, verificou-se que o incremento das doses de P não promoveu alterações significativas no teor foliar de Mg. Na ausência de aplicação de BiomaPhos®, a dose de 100 de P resultou em redução significativa do teor foliar de Mg em comparação às doses 0 e 50 de P. Ao se analisar o efeito dos tratamentos com BiomaPhos®, independentemente da dose de P utilizada, constatou-se que o tratamento B200 promoveu redução significativa do teor foliar de Mg em relação aos tratamentos B0 e B200+Az+Rt.

Tabela 1.8. Teor de magnésio foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

Tratamentos	B 0	B 200	B 200+Az+Rt ¹
P0	3,20 Aa	2,62 Ab	3,32 Aa ²
P50	3,42 Aa	2,38 Ab	3,18 Aa
P100	2,90 Ba	2,58 Ab	3,10 Aa
Bioma		67,97**	
P		4,48*	
Bioma x P		5,50**	
C.V. (%)		5,42	

¹ Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

² Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; * Significativo a 5%.

Teor de S

O teor foliar de enxofre foi influenciado significativamente pelo fator BiomaPhos® (Tabela 1.9). A aplicação de B 200+Az+Rt resultou em redução significativa do teor de S em comparação ao B200, enquanto este último não diferiu do controle sem aplicação de BiomaPhos®. Não foram observados efeitos das doses de P nem interações significativas entre os fatores.

Tabela 1.9. Teor de enxofre foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Enxofre
0	1,70 ab ¹
200	1,71 a
200+AzRt ²	1,52 b
Fósforo (P)	Enxofre
0	1,68 a
50	1,58 a
100	1,68 a
Bioma	4,01*
P	1,14 ^{ns}
Bioma x P	0,31 ^{ns}
C.V. (%)	11,42

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Teores de B, Fe, Mn e Zn

Não foi observada interação significativa entre os fatores para o teor foliar de B, Fe, Mn e Zn, sendo observado efeito isolado dos tratamentos com Bioma para Fe, Mn e Zn (Tabela 1.10). A aplicação de B200 e B200+Az+Rt resultou em redução significativa do teor de Fe em relação ao B0. Para o Mn, o tratamento B200 promoveu redução significativa do teor foliar, diferindo dos tratamentos B0 e B200+Az+Rt. Para o teor foliar de Zn, observou-se que o tratamento B200+Az+Rt proporcionou o maior teor, diferindo significativamente dos tratamentos B200 e controle. Não se verificou efeito significativo das doses de P sobre os teores foliares de B, Fe, Mn e Zn.

Tabela 1.10. Teores de boro, ferro, manganês e zinco foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Boro	Ferro	Manganês	Zinco
0	32,42 a ¹	125,08 a ¹	15,67 a	24,50 b
200	29,67 a	105,17 b	12,75 b	22,92 c
200+Az+Rt ²	30,75 a	107,17 b	16,17 a	26,25 a
Bioma	1,03 ^{ns}	19,62**	9,60**	17,36**
P	2,46 ^{ns}	2,36 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,92 ^{ns}
Bioma x P	0,92 ^{ns}	1,37 ^{ns}	2,70 ^{ns}	1,79 ^{ns}
C.V. (%)	15,29	7,63	13,88	5,64

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Teor de Cu

Observou-se interação significativa entre as doses de fósforo e os tratamentos com BiomaPhos® para o teor foliar de Cu (Tabela 1.11). Nos tratamentos B200 e B200+Az+Rt, o incremento das doses de P não provocou alterações significativas no teor foliar de Cu. Na ausência de BiomaPhos®, a dose de 100 de P resultou em aumento significativo do teor foliar de Cu em relação às doses 0 e 50 de P. Além disso, na dose de P100, a aplicação de BiomaPhos® reduziu significativamente o teor foliar de Cu em comparação ao tratamento B0.

Tabela 1.11. Teor de magnésio foliar em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

Tratamentos	B0	B200	B200+Az+Rt ¹
P0	7,00 Ba	6,75 Aa	6,75 Aa ²
P50	7,00 Ba	7,00 Aa	7,00 Aa
P100	7,75 Aa	6,50 Ab	7,00 Ab
Bioma		9,08**	
P		2,27 ^{ns}	
Bioma x P		5,19**	
C.V. (%)		4,20	

¹ Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

² Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

Teor de P nos grãos

Não foi observada interação significativa entre os tratamentos de BiomaPhos® e a adubação fosfatada para o teor fósforo nos grãos (Tabela 1.12), apresentando média geral de 3,60 g/kg sem efeito significativo isolado dos fatores.

Tabela 1.12. Teor de fósforo nos grãos em feijoeiros submetidos a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Fósforo nos grãos
0	3,57 a ¹
200	3,68 a
200+Az+Rt ²	3,55 a
Fósforo (P)	Fósforo nos grãos
0	3,69 a
50	3,49 a
100	3,61 a
Bioma	0,81 ^{ns}
P	1,77 ^{ns}
Bioma x P	1,35 ^{ns}
C.V. (%)	7,26

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

SPAD (quinze dias após a emergência - DAE) e SPAD (florescimento)

O índice SPAD não foi influenciado pela interação entre os fatores BiomaPhos® e doses de P, porém ambos apresentaram efeito significativo de forma isolada. No SPAD 1, observou-se efeito isolado do BiomaPhos®, sendo que o tratamento B200 apresentou a menor média e diferiu significativamente de B0 e B200+Az+Rt (Tabela 1.13). No SPAD avaliado no florescimento, verificou-se efeito significativo das doses de P, com aumento dos valores do índice SPAD em função da aplicação de fósforo, não sendo observada diferença significativa entre as doses de P50 e P100 (Tabela 1.13).

Tabela 1.13. Índice SPAD em plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

Tratamentos BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	SPAD	
	SPAD- 15 DAE	SPAD florescimento
0	36,70 a ¹	38,43 a
200	34,26 b	40,17 a
200+Az+Rt ²	37,78 a	38,13 a
Fósforo (P)	SPAD-15 DAE	SPAD florescimento
0	36,23 a	34,76 b
50	36,21 a	41,38 a
100	36,29 a	40,59 a
Bioma	17,45**	3,38 ^{ns}
P	0,01 ^{ns}	36,70**
Bioma x P	0,88 ^{ns}	0,37 ^{ns}
C.V. (%)	4,12	5,32

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Altura de plantas

Não foi observada interação significativa entre os fatores para altura das plantas, nas medições realizadas em 12, 26 de março e 02 de abril de 2024, sendo observado efeito isolado dos tratamentos com BiomaPhos® e doses de P (Tabela 1.14). Na primeira avaliação, realizada em 12/03/2024 verificou-se que a aplicação de BiomaPhos® reduziu significativamente o desenvolvimento das plantas. Por outro lado, quando as plantas estavam mais desenvolvidas (26/03/2024) observou-se efeito significativo na altura das plantas com o incremento das doses de P. Já na última avaliação não foram observados efeitos isolados tanto para a aplicação de BiomaPhos® como para doses de P.

Tabela 1.14. Altura de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

Tratamentos BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Altura		
	12/03/24	26/03/24	02/04/24
0	10,13 a ¹	19,52 a	32,69 a
200	8,16 b	20,15 a	29,92 a
200+Az+Rt ²	8,53 b	20,23 a	30,36 a
Fósforo (P)	12/03/24	26/03/24	02/04/24
0	8,54 a	19,31 b	29,87 a
50	9,04 a	20,48 a	31,20 a
100	9,24 a	20,12 ab	31,90 a
Bioma	22,84**	1,62 ^{ns}	1,46 ^{ns}
P	2,70 ^{ns}	3,77*	0,71 ^{ns}
Bioma x P	2,51 ^{ns}	1,90 ^{ns}	1,33 ^{ns}
C.V. (%)	8,50	5,34	13,74

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Observou-se interação significativa entre as doses de fósforo e os tratamentos com BiomaPhos® na segunda avaliação de altura (19/03/2024) (Tabela 1.15). Na ausência da aplicação de BiomaPhos®, a dose de 100 de P resultou em aumento significativo da altura em comparação às doses 0 e 50 de P. A aplicação do B200 proporcionou aumento significativo da altura nas doses de 50 e 100 de P em relação ao tratamento controle. No tratamento B200+Az+Rt, não foram observadas diferenças significativas entre as doses de P.

Considerando a aplicação de P, verificou-se que, na ausência de adubação fosfatada, houve diferença significativa na altura das plantas, com desenvolvimento menor para o tratamento B200+Az+Rt comparado ao tratamento controle. No entanto, quando o P foi aplicado na dose de P50 em combinação com B200 e B200+Az+Rt, observou-se um maior crescimento quando aplicou-se apenas o B 200. E, ambos os tratamentos não mostraram diferença significativa em relação ao tratamento Bioma 0. Considerando a dose de 100 P

verificou-se efeito significativo dos tratamentos, com menor valor de altura para o tratamento B200+Az+Rt (Tabela 1.15).

Tabela 1.15. Altura de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), no dia 19/03/2024.

Tratamentos	B0	B 200	B 200+Az+Rt ²
P0	17,85 Ba	16,90 Bab	15,35 Ab ¹
P50	18,30 Bab	19,50 Aa	16,30 Ab
P100	21,48 Aa	18,83 ABb	16,02 Ac
Bioma		25,38**	
P		9,37**	
Bioma x P		3,74*	
C.V. (%)		6,67	

¹ Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; * Significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Diâmetro do caule

Observou-se interação significativa entre as doses de P e os tratamentos com BiomaPhos® para o diâmetro do caule na primeira avaliação (12/03) (Tabela 1.16). No desdobramento da interação, verificou-se que, no B0, não houve diferença significativa entre as doses de P. No B200, P50 proporcionou maior diâmetro do caule, diferindo de P0, enquanto P100, não se diferenciou de P0 e P50. No tratamento B200+Az+Rt, P100 apresentou maior diâmetro do caule, diferindo de P0 e P50. No desdobramento entre BiomaPhos® dentro de cada dose de P, verificou-se que, em P0 e P100, não houve diferença significativa entre os tratamentos com BiomaPhos®. Em P50, o tratamento B200 apresentou maior diâmetro do caule, diferindo de B 0 e B200+Az+Rt, os quais não diferiram entre si (Tabela 1.16).

Na segunda avaliação (19/03) do diâmetro do caule, observou-se efeito significativo apenas das doses de P. A dose P50 apresentou maior diâmetro em relação a P0. Já a dose de P100 não diferiu do controle e nem da dose P50 (Tabela 1.17).

Nas avaliações de 26/03 e 02/04, verificou-se efeito isolado dos tratamentos com BiomaPhos® e das doses de P. Em 26/03, o menor diâmetro foi observado no tratamento B200+Az+Rt, diferindo do tratamento sem aplicação de BiomaPhos®. Para as doses de P, P100 apresentou maior diâmetro em comparação a P0. Entre as doses de P50 e P100 não houve diferença significativa (Tabela 1.17).

Na avaliação realizada em 02/04, o diâmetro do caule foi influenciado pelos tratamentos com BiomaPhos®. O tratamento B200 apresentou menor diâmetro, diferindo significativamente do controle (sem aplicação de BiomaPhos®), enquanto B200 e B200+Az+Rt

não diferiram entre si. Para as doses de P, observou-se que P100 apresentou maior diâmetro do caule em relação a P0. Não tendo diferença entre as doses de 50 e 100 (Tabela 1.17).

Tabela 1.16. Diâmetro do caule de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), no dia 12/03/2024.

Tratamentos	B 0	B 200	B 200+Az+Rt ¹
P0	3,67 Aa	3,70 Ba	3,47 Ba ²
P50	3,55 Ab	4,10 Aa	3,55 Bb
P100	3,75 Aa	3,90 ABa	3,80 Aa
Bioma		17,40**	
P		4,22**	
Bioma x P		5,83**	
C.V. (%)		3,48	

¹ Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

² Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%.

Tabela 1.17. Diâmetro do caule de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamentos BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Diâmetro do caule		
	19/03/2024	26/03/2024	02/04/2024
0	4,76 a ¹	5,47 a	5,95 a
200	4,86 a	5,37 ab	5,70 b
200+Az+Rt ²	4,78 a	5,26 b	5,74 ab
Fósforo (P)	19/03/2024	26/03/2024	02/04/2024
0	4,62 b	5,24 b	5,65 b
50	4,97 a	5,42 ab	5,87 ab
100	4,81 ab	5,44 a	5,88 a
Bioma	0,41 ^{ns}	4,25*	5,09*
P	4,91*	4,45*	4,48*
Bioma x P	0,27 ^{ns}	2,61 ^{ns}	0,26 ^{ns}
C.V. (%)	5,84	3,39	6,67

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Número de Trifólios

O número de trifólios apresentou comportamento semelhante entre os tratamentos com aplicação de BiomaPhos® nas três primeiras avaliações (12/03, 19/03 e 26/03). Nessas avaliações, não houve diferença significativa entre B0, B200 e B200+Az+Rt, com médias de 2, 5 e 9 trifólios, respectivamente. Já na avaliação realizada em 02/04, observou-se diferença significativa entre os tratamentos com BiomaPhos®. O tratamento B0 apresentou maior número de trifólios, diferindo de B200+Az+Rt. Quanto às doses de P, houve efeito significativo na

avaliação de 19/03, quando P50 e P100 apresentaram maior número de trifólios em comparação a P0 (Tabela 1.18).

Tabela 1.18 - Número de trifólios de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamentos	Datas de avaliação do número de trifólios			
BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	12/03/2024	19/03/2024	26/03/2024	02/04/2024
0	2 a ¹	5 a	9 a	16 a
200	2 a	5 a	9 a	15 ab
200+Az+Rt ²	2 a	5 a	9 a	14 b
Fósforo (P)	12/03/2024	19/03/2024	26/03/2024	02/04/2024
0	2 a	4 b	9 a	14 a
50	2 a	5 a	8 a	15 a
100	2 a	5 a	9 a	16 a
Bioma	0,31 ^{ns}	2,10 ^{ns}	0,71 ^{ns}	3,77*
P	2,15 ^{ns}	19,04**	2,49 ^{ns}	3,23 ^{ns}
Bioma x P	0,77 ^{ns}	0,31 ^{ns}	1,51 ^{ns}	0,99 ^{ns}
C.V. (%)	4,93	7,07	6,85	11,15

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Os tratamentos não influenciaram o número de vagens por planta, matéria seca da parte aérea, peso fresco das vagens + grãos, massa fresca de grãos por planta, massa seca de grãos por planta, massa seca de vagens (sem grão), Matéria seca aérea total, número total de grãos por planta e número de grãos por vagem (Tabela 1.19).

A produtividade foi influenciada pelo efeito isolado da aplicação de BiomaPhos®. Os tratamentos B200 e B200+Az+Rt apresentaram maior produtividade em comparação ao tratamento sem aplicação de BiomaPhos®, com incrementos de 25% e 23%, respectivamente

Tabela 1.19. Parâmetros de crescimento vegetal e produtividade de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamento BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Vagens por planta	MSA ¹ (g planta ⁻¹)	MFV ¹ (g planta ⁻¹)	MFG ¹ (g planta ⁻¹)	MSG ¹ (g planta ⁻¹)	MSV ¹ (g planta ⁻¹)	MSAT ¹ (g planta ⁻¹)	NTGP ¹	Grãos por vagem (1 planta)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
0	23 a ²	6,1 a	35,26 a	23,4 a	20,5 a	6,02 a	33,71 a	95 a	4 a	3.483,3 b
200	19 a	7,0 a	30,36a	20,4 a	18,1 a	5,25 a	29,87 a	85 a	4 a	4.346,7 a
200+Az+Rt ³	19 a	7,4 a	33,58a	20,9 a	17,6 a	5,37 a	29,77 a	83 a	4 a	4.282,6 a
Fósforo (P)										
0	19 a	6,1 a	28,85 a	19,9 a	17,6 a	5,15 a	28,88 a	83 a	4 a	4076,3 a
50	21 a	7,0 a	33,49a	22,2 a	19,2 a	5,59 a	31,71 a	88 a	4 a	4041,4 a
100	21 a	7,4 a	36,87a	22,7 a	19,4 a	5,90 a	32,77 a	93 a	4 a	3995,0 a
Bioma	2,11 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,75 ^{ns}	1,15 ^{ns}	1,58 ^{ns}	1,50 ^{ns}	1,45 ^{ns}	1,35 ^{ns}	0,06 ^{ns}	9,30 ^{**}
P	1,24 ^{ns}	3,04 ^{ns}	1,96 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,62 ^{ns}	1,25 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Bioma x P	0,22 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,38 ^{ns}	1,26 ^{ns}	1,01 ^{ns}
C.V. (%)	19,89	19,25	30,11	24,05	23,2	21,14	20,8	23,35	8,72	13,5

¹MSA=matéria seca da parte aérea; MFV= Matéria fresca das vagens (vagem + grão); MFG= Massa fresca de grãos por planta; MSG= Massa seca de grãos; MSV=Massa seca de vagens (sem grão), MSAT=Matéria seca aérea total; NTGP=Número total de grãos por planta

²Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

³Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

4.1.3 Experimento de Campo - Segundo Ciclo

Índice de cor verde – SPAD

No 2º ciclo do experimento de campo, não houve interação significativa entre os fatores BiomaPhos® e doses de P para o índice de cor verde (SPAD) (Tabela 1.21). O índice SPAD foi influenciado somente pelo efeito isolado do BiomaPhos® na primeira avaliação realizada em 01/10/2025, em que o tratamento B200+Az+Rt apresentou a maior média (41,97) quando comparada aos tratamentos B0 (36,93) e B200 (39,05), demonstrando o efeito positivo do uso do *Azospirillum* associado ao BiomaPhos®.

Tabela 1.21. Índice de cor verde foliar (SPAD) de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamentos	SPAD em diferentes datas				
	01/10/25	08/10/25	15/10/25	23/10/25	29/10/25
BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)					
0	36,93 b ¹	40,56 a	41,55 a	43,46 a	41,48 a
200	39,05 b	42,02 a	39,78 a	44,70 a	39,32 a
200+Az+Rt ²	41,97 a	42,91 a	41,13 a	44,42 a	40,38 a
Fósforo (P)					
0	39,94 a	41,68 a	40,48 a	44,35 a	41,09 a
50	38,78 a	42,02 a	40,87 a	43,74 a	40,11 a
100	39,22 a	41,80 a	41,09 a	44,50 a	39,98 a
F (Bioma)	12,18**	2,59 ^{ns}	1,62 ^{ns}	1,11 ^{ns}	1,90 ^{ns}
F (P)	0,66 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,60 ^{ns}
F (Bioma x P)	1,70 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,33 ^{ns}
C.V. (%)	6,39	6,10	6,26	4,83	6,73

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Altura

Observou-se que os tratamentos avaliados não influenciaram estatisticamente a altura das plantas em nenhuma época avaliada, resposta diferente à encontrada no ciclo 1. Os valores médios de altura aumentaram conforme o crescimento das plantas, sendo que na última avaliação, os valores variaram de 27,54 a 29,85 cm (Tabela 1.22).

Tabela 1.22. Altura de plantas de feijoeiro submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamentos BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Altura de plantas em diferentes datas				
	01/10/25	08/10/25	15/10/25	23/10/25	29/10/25
0	8,78 a ¹	12,98 a	19,13 a	22,10 a	27,88 a
200	8,61 a	13,20 a	19,15 a	22,42 a	29,65 a
200+Az+Rt ²	8,21 a	13,23 a	19,02 a	22,51 a	29,33 a
Fósforo (P)					
0	8,28 a	13,59 a	19,15 a	22,74 a	29,85 a
50	8,41 a	12,87 a	18,48 a	21,79 a	27,54 a
100	8,91 a	12,96 a	19,67 a	22,50 a	29,47 a
F (Bioma)	0,82 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,01 ^{ns}	1,16 ^{ns}	1,65 ^{ns}
F (P)	1,08 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,85 ^{ns}	2,82 ^{ns}
F (Bioma x P)	0,40 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,11 ^{ns}	1,01 ^{ns}
C.V. (%)	13,07	10,32	11,30	8,30	8,80

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Diâmetro

Não houve interação significativa entre os fatores BiomaPhos® e fatores isolados nas avaliações de diâmetro 01/10; 08/10; 15/10 e 29/10 (Tabela 1.23). Houve interação significativa entre as doses de P e BiomaPhos® para o diâmetro avaliado em 23/10/2025 (Tabela 1.24). Verificou-se que, na ausência de BiomaPhos® (B0) e na aplicação de B200+Az+Rt, as doses de P não promoveram diferenças significativas no diâmetro. Por outro lado, sob aplicação de B200, a dose de P100 resultou em maior diâmetro em comparação à dose de 50%, evidenciando resposta positiva à adubação fosfatada nessa condição. Analisando o efeito de BiomaPhos® dentro de cada dose de P, constatou-se que apenas na dose P100 houve diferença significativa entre os tratamentos, sendo B200 superior ao controle (B0). Nas demais doses, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos biológicos.

Tabela 1.23. Diâmetro de caule de plantas de feijoeiro submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamentos	Diâmetro de caule em diferentes datas			
	01/10/25	08/10/25	15/10/25	29/10/25
BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)				
0	3,30 a ¹	4,20 a	4,93 a	22,09 a
200	3,29 a	4,23 a	4,85 a	19,32 a
200+Az ²	3,38 a	4,34 a	4,92 a	19,06 a
Fósforo (P)				
0	3,23 a	4,20 a	4,92 a	18,72 a
50	3,24 a	4,18 a	4,82 a	20,56 a
100	3,49 a	4,38 a	4,95 a	21,20 a
F (Bioma)	0,61 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,13 ^{ns}	2,11 ^{ns}
F (P)	4,57*	0,90 ^{ns}	0,39 ^{ns}	1,24 ^{ns}
F (Bioma x P)	1,45 ^{ns}	0,71 ^{ns}	1,15 ^{ns}	0,22 ^{ns}
C.V. (%)	7,14	9,25	8,25	19,89

¹Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² AZ= *Azospirillum* sp + RT= *Rhizobium tropici*

Tabela 1.24. Diâmetro do caule de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), no dia 23/10/2025.

Tratamentos	B0	B 200	B200+Az+Rt ²
P0	6,90 Aa	6,62 ABa	6,40 Aa ¹
P50	6,26 Aa	6,22 Ba	6,51 Aa
P100	5,84 Ab	7,83 Aa	6,75 Aab
F (Bioma)		1,59 ^{ns}	
F (P)		1,19 ^{ns}	
F (Bioma x P)		2,85*	
C.V. (%)		11,68	

¹Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² AZ= *Azospirillum* sp + RT= *Rhizobium tropici*

Número de trifólios

O número de trifólios apresentou efeito significativo do fator BiomaPhos® nas avaliações realizadas em 01/10/2025 e 23/10/2025 (Tabela 1.25). Na primeira avaliação, o tratamento B200+Az+Rt apresentou maior número de trifólios em comparação ao B0 e B200, que não diferiram entre si. Na avaliação de 23/10, observou-se novamente efeito significativo de BiomaPhos®, com o tratamento B200+Az+Rt apresentando maior

número de trifólios, diferindo do controle B0, enquanto o tratamento B200 não diferiu estatisticamente dos demais. Nas demais datas de avaliação (08/10, 15/10 e 29/10), não foram constatadas diferenças estatísticas entre os tratamentos com BiomaPhos®. Para o fator das doses de P e para a interação BiomaPhos® × P, não foram observados efeitos significativos em nenhuma das datas avaliadas.

Tabela 1.25 - Número de trifólios de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamentos BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Datas de avaliação do número de trifólios				
	01/10/25	08/10/25	15/10/25	23/10/25	29/10/25
0	1 b ¹	3 a	6 a	10 b	16 a
200	1 b	3 a	6 a	11 ab	17 a
200+Az+Rt ²	2 a	3 a	7 a	12 a	18 a
Fósforo (P)					
0	1 a	3 a	6 a	11 a	17 a
50	1 a	3 a	6 a	11 a	17 a
100	1 a	3 a	6 a	11 a	17 a
F (Bioma)	4,6*	0,37 ^{ns}	2,86 ^{ns}	7,10*	1,87 ^{ns}
F (P)	0,09 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,25 ^{ns}
F (Bioma x P)	1,30 ^{ns}	0,92 ^{ns}	1,89 ^{ns}	1,96 ^{ns}	2,10 ^{ns}
C.V. (%)	40,91	17,24	18,14	13,03	13,71

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Índice de área foliar - IAF

O índice de área foliar (IAF) foi influenciado significativamente pelo fator BiomaPhos® (Tabela 1.26). Os tratamentos B200 e B200+Az+Rt apresentaram maiores valores de IAF em comparação ao controle (B0), diferindo estatisticamente deste, o que evidencia efeito positivo do tratamento biológico sobre o desenvolvimento vegetativo da cultura. Não foram observados efeitos significativos das doses de P, tampouco da interação BiomaPhos® × P, indicando que o incremento no IAF foi atribuído ao uso do produto biológico, independentemente da adubação fosfatada.

Tabela 1.26. Índice de área foliar (IAF) de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	IAF
0	4,18 b ¹
200	5,18 a
200+Az+Rt ²	5,45 a
Fósforo (P)	
0	4,96 a
50	4,88 a
100	4,98 a
F (Bioma)	24,63**
F (P)	0,16 ^{ns}
F (Bioma x P)	0,72 ^{ns}
C.V. (%)	9,44

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

A massa fresca da planta no florescimento foi influenciada significativamente pelo efeito isolado das doses de P (Tabela 1.27). Não foram observados efeitos significativos do fator BiomaPhos®, tampouco da interação BiomaPhos® × P. Verificou-se que a aplicação de P100 proporcionou maior massa fresca da planta em comparação à dose de P50, não diferindo, contudo, do tratamento P0.

Tabela 1.27. Massa fresca da planta no florescimento de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Massa fresca (g)
0	105,54 a ¹
200	103,60 a
200+Az+Rt ²	123,13 a
Fósforo (P)	
0	117,96 ab
50	93,08 b
100	121,24 a
F (Bioma)	2,04 ^{ns}
F (P)	4,18 *
F (Bioma x P)	0,99 ^{ns}
C.V. (%)	23,55

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

A massa seca da planta no florescimento 2 não foi influenciada significativamente pelas doses de fósforo, pelo tratamento com BiomaPhos® ou pela interação BiomaPhos® × P. Os valores observados variaram de 12,88 a 16,00 g (Tabela 1.28).

Tabela 1.28. Massa seca da planta no florescimento de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Massa seca (g)
0	14,62 a ¹
200	12,88 a
200+Az+Rt ²	16,00 a
Fósforo (P)	
0	14,85 a
50	13,13 a
100	15,52 a
F (Bioma)	3,13 ^{ns}
F (P)	1,93 ^{ns}
F (Bioma x P)	0,45 ^{ns}
C.V. (%)	21,14

¹ Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Observou-se interação significativa entre as doses de P e os tratamentos com BiomaPhos® para a massa fresca da planta avaliada no momento da colheita (Tabela 1.30).

Analisando o efeito das doses de P dentro de cada tratamento com BiomaPhos®, a aplicação de P promoveu aumento significativo da massa fresca no tratamento B0. As doses de P50 (85,23) e P100 (80,54) apresentaram maiores valores em relação à dose zero (46,60), não diferindo entre si. No tratamento B200, verificou-se comportamento distinto: a dose de P100 (96,31) proporcionou a maior massa fresca, diferindo da dose de P50 (72,83), enquanto a dose zero (52,85) apresentou valor intermediário. Esse resultado indica resposta mais expressiva à adubação fosfatada quando associada ao B200, especialmente na dose máxima de P. Já no tratamento B200+Az+Rt, não houve diferença significativa entre as doses de P (valores variando de 43,63 a 51,24), evidenciando ausência de resposta à adubação fosfatada nessa condição.

Analisando o efeito dos tratamentos com BiomaPhos® dentro de cada dose de P, o tratamento B200 apresentou maior massa fresca (52,85) na ausência de P (P0), não diferindo de B0 (46,60), enquanto B200+Az+Rt apresentou valor intermediário (51,24). Na dose de P50 de P, o tratamento B0 (85,23) foi superior ao B200+Az+Rt (49,00), enquanto B200 apresentou valor intermediário (72,83). Na dose de P100, o tratamento B200 destacou-se com o maior valor (96,31), diferindo de B200+Az+Rt (43,63), enquanto B0 apresentou desempenho intermediário (80,54).

Os resultados indicam que o efeito da adubação fosfatada sobre a massa fresca depende do tratamento biológico utilizado. O tratamento B200 potencializou a resposta à dose máxima de P, sugerindo possível sinergismo entre o inoculante e maior disponibilidade de P. Em contraste, a associação B200+Az+Rt não promoveu incremento na massa fresca com o aumento das doses de P, indicando que, nas condições avaliadas, não houve efeito complementar da coinoculação para essa variável.

Tabela 1.30. Massa fresca de plantas de feijoeiros (avaliada na colheita) submetidas a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação).

Tratamentos	B0	B200	B200+Az+Rt ²
P0	46,60 Ba ¹	52,85 Ba	51,24 Aa
P50	85,23 Aa	72,83 ABb	49,00 Ab
P100	80,54 Aa	96,31 Aa	43,63 Ab
F (Bioma)		8,97**	
F (P)		6,78**	
F (Bioma x P)		3,53*	
C.V. (%)		25,56	

¹ Dados seguidos pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; * Significativo a 5%.

² Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Parâmetros de produção/Produtividade

Os parâmetros massa fresca e seca de grãos, massa seca de vagens, número de vagens por planta, número de grãos por planta e número de grãos por vagem não foram influenciados significativamente pelas doses de P, pelo tratamento com BiomaPhos® ou pela interação BiomaPhos® × P (Tabela 1.31). Por outro lado, os parâmetros massa fresca de vagens e produtividade foram influenciados significativamente pelo efeito isolado de BiomaPhos®. A produtividade foi incrementada pela aplicação de BiomaPhos®, sendo o tratamento controle (B0) o que apresentou menor rendimento, diferindo significativamente dos tratamentos B200 e B200+Az+Rt. Esse resultado evidencia efeito positivo do tratamento biológico sobre o desempenho produtivo da cultura, independentemente das doses de P.

A massa seca, por sua vez, foi influenciada significativamente pelos efeitos isolados de BiomaPhos® e das doses de P, sem ocorrência de interação significativa. O tratamento B200+Az+Rt apresentou menor valor de massa seca, diferindo de B0 e B200. Em relação às doses de P, a aplicação de P50 e P100 proporcionou aumento significativo da massa seca em comparação à ausência de adubação fosfatada.

Tabela 1.31. Parâmetros de crescimento vegetal e produtividade de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), em diferentes datas de avaliação.

Tratamento BiomaPhos® (mL ha ⁻¹)	Vagens por planta	MSA ¹ (g planta ⁻¹)	MFV ¹ (g planta ⁻¹)	MFG ¹ (g planta ⁻¹)	MSG ¹ (g planta ⁻¹)	MSV ¹ (g planta ⁻¹)	MSAT ¹ (g planta ⁻¹)	NTGP ¹	Grãos por vagem (1 planta)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
0	23 a ²	6,1 a	35,26 a	23,4 a	20,5 a	6,02 a	33,71 a	95 a	4 a	3.483,3 b
200	19 a	7,0 a	30,36 a	20,4 a	18,1 a	5,25 a	29,87 a	85 a	4 a	4.346,7 a
200+Az+Rt ³	19 a	7,4 a	33,58 a	20,9 a	17,6 a	5,37 a	29,77 a	83 a	4 a	4.282,6 a
Fósforo (P)										
0	19 a	6,1 a	28,85 a	19,9 a	17,6 a	5,15 a	28,88 a	83 a	4 a	4076,3 a
50	21 a	7,0 a	33,49 a	22,2 a	19,2 a	5,59 a	31,71 a	88 a	4 a	4041,4 a
100	21 a	7,4 a	36,87 a	22,7 a	19,4 a	5,90 a	32,77 a	93 a	4 a	3995,0 a
Bioma	2,11 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,75 ^{ns}	1,15 ^{ns}	1,58 ^{ns}	1,50 ^{ns}	1,45 ^{ns}	1,35 ^{ns}	0,06 ^{ns}	9,30 ^{**}
P	1,24 ^{ns}	3,04 ^{ns}	1,96 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,62 ^{ns}	1,25 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Bioma x P	0,22 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,38 ^{ns}	1,26 ^{ns}	1,01 ^{ns}
C.V. (%)	19,89	19,25	30,11	24,05	23,2	21,14	20,8	23,35	8,72	13,5

¹ MSA=matéria seca da parte aérea; MFV= Matéria fresca das vagens (vagem + grão); MFG= Massa fresca de grãos por planta; MSG= Massa seca de grãos; MSV=Massa seca de vagens (sem grão), MSAT=Matéria seca aérea total; NTGP=Número total de grãos por planta

² Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

³ Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

4.2 Avaliação de trocas gasosas

Experimento de campo – primeiro ciclo

Os parâmetros fotossintéticos das plantas de feijoeiro foram influenciados principalmente pelas doses de P, enquanto o efeito do BiomaPhos® foi menos expressivo e a interação entre os fatores não apresentou significância para nenhuma das variáveis avaliadas (Figura 2.1). Para o fator BiomaPhos®, foram observadas diferenças significativas apenas para a concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência do uso da água (WUE), déficit de pressão de vapor (VpdL) e temperatura foliar (T°leaf). A Ci foi maior no tratamento sem inoculação (B0) (290,5 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), diferindo dos tratamentos com aplicação de BiomaPhos®. Para a WUE, o tratamento com 200 mL ha⁻¹ de BiomaPhos® (B200) apresentou maior valor (3,54), enquanto o tratamento com coinoculação (B200+Az+Rt) apresentou o menor valor (3,11).

O VpdL e a temperatura foliar foram maiores nos tratamentos com inoculação, especialmente no tratamento com coinoculação (1,81 e 30,6 °C, respectivamente), diferindo do tratamento B0, que apresentou os menores valores. As demais variáveis, incluindo assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (gs), taxa de transpiração (E), eficiência de carboxilação (CE), fluorescência (Fv'/Fm'), rendimento quântico do fotossistema II (ΦPSII), coeficientes de extinção fotoquímica (qP) e não fotoquímica (qN), bem como a taxa de transporte de elétrons (ETR), não apresentaram diferenças significativas em função do BiomaPhos®.

Em relação às doses de P, foram observadas diferenças significativas para diversas variáveis. A assimilação líquida de CO₂ (A) foi menor na dose P0 (17,28 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), diferindo das doses de 50% da recomendação (P50) e 100% da recomendação (P100), que apresentaram maiores valores (21,16 e 21,44 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente). A concentração interna de CO₂ (Ci) foi maior nas doses de P0 e P100 de P, enquanto a dose de P50 apresentou menor valor. A eficiência do uso da água (WUE) foi maior na dose P50 (3,65), diferindo das demais. Já a eficiência de carboxilação (CE) apresentou menor valor em P0.

As variáveis relacionadas à fluorescência da clorofila também foram influenciadas pelas doses de P. O Fv'/Fm' e o ΦPSII apresentaram menores valores na dose P0, indicando menor eficiência fotoquímica nessa condição. O coeficiente de extinção fotoquímica (qP) foi menor na dose P0, enquanto o coeficiente de extinção não fotoquímica (qN) também apresentou menor valor nessa condição.

A taxa de transporte de elétrons (ETR) foi significativamente menor em P0 (158,35), diferindo das demais doses, que apresentaram maiores valores. Não foram observadas diferenças significativas para a condutância estomática (gs), taxa de transpiração (E), déficit de pressão de vapor (VpdL) e temperatura foliar (T°leaf) em função das doses de P. De forma geral, os resultados indicam que as doses de P exerceram maior influência sobre os parâmetros fotossintéticos das plantas de feijoeiro, especialmente sobre a assimilação de carbono e a eficiência fotoquímica, enquanto o BiomaPhos® promoveu efeitos mais restritos a variáveis relacionadas ao estado hídrico e trocas gasosas.

Tabela 2.1. Parâmetros fotossintéticos¹ de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), referentes ao primeiro ciclo de cultivo.

Trat BiomaPhos®	A	Gs	Ci	E	WUE	CE	Fv'/Fm'	ΦPSII	qP	qN	ETR	VpdL	T°leaf
0	20,32 a ²	0,39 a	290,5 a	6,33 a	3,20 ab	0,07 a	0,575 a	0,38 a	0,67 a	2,37 a	168,48 a	1,53 b	27,7 c
200	21,11 a	0,35 a	275,3 b	6,00 a	3,54 a	0,07 a	0,571 a	0,40 a	0,70 a	2,34 a	174,15 a	1,60 b	29,5 b
200+AZ+RT ³	18,46 a	0,31 a	275,7 b	5,95 a	3,11 b	0,07 a	0,560 a	0,39 a	0,70 a	2,30 a	172,14 a	1,81 a	30,6 a
Fósforo (P)													
0	17,28 b	0,33 a	289,6 a	5,79 a	2,97 b	0,06 b	0,542 b	0,36 b	0,66 b	2,20 b	158,35 b	1,68 a	29,2 a
50	21,16 a	0,33 a	265,8 b	5,84 a	3,65 a	0,08 a	0,578 ab	0,41 a	0,71 a	2,39 ab	181,64 a	1,69 a	29,5 a
100	21,44 a	0,40 a	285,9 a	6,66 a	3,22 b	0,08 a	0,584 a	0,40 a	0,68 ab	2,42 a	174,78 a	1,58 a	29,2 a
Bioma	1,87 ^{ns}	2,55 ^{ns}	3,84*	0,53 ^{ns}	5,15*	2,13 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,50 ^{ns}	3,28 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,46 ^{ns}	9,42**	48,32**
P	5,43*	2,90 ^{ns}	8,38**	2,95 ^{ns}	11,80**	8,88**	4,54*	7,75**	6,38**	4,40*	7,94**	1,59 ^{ns}	0,64 ^{ns}
Bioma x P	0,75 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,84 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,37 ^{ns}
C.V. (%)	17,30	24,66	5,46	16,09	10,54	16,47	6,52	8,60	5,10	8,29	8,57	10,06	2,48

¹ A = assimilação líquida de CO₂; gs = condutância estomática; Ci = concentração interna de CO₂; E = taxa de transpiração; WUE = eficiência do uso da água; CE = eficiência da carboxilação; Fv'/Fm' = eficiência quântica do fotossistema II; ΦPSII = eficiência quântica efetiva do Fotossistema II; qP = coeficiente de extinção fotoquímica; qN = coeficiente de extinção não-fotoquímica; ETR = taxa de transporte de elétrons; VpdL = déficit de Pressão de Vapor; T°leaf = temperatura foliar.

² Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. **Significativo a 1%; ns = Não significativo a 5%.

³Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Experimento de campo - segundo ciclo

Os parâmetros fotossintéticos das plantas de feijoeiro foram, em geral, pouco influenciados pelos fatores avaliados, sendo observados efeitos significativos principalmente para o fator BiomaPhos®, enquanto as doses de P e a interação entre os fatores não apresentaram efeito significativo para a maioria das variáveis (Tabela 2.2).

A assimilação líquida de CO₂ (A), a concentração interna de CO₂ (C_i), a taxa de transpiração (E), a eficiência do uso da água (WUE), a eficiência de carboxilação (CE), a fluorescência (Fv'/Fm') e o rendimento quântico do fotossistema II (ΦPSII) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, tanto para BiomaPhos® quanto para as doses de P. Por outro lado, a condutância estomática (g_s) foi influenciada pelo BiomaPhos®, com o tratamento sem inoculação apresentando maior valor (0,52 mol m⁻² s⁻¹), diferindo do tratamento com 200 mL ha⁻¹ (0,46 mol m⁻² s⁻¹), enquanto o tratamento com coinoculação apresentou valor intermediário.

Para as variáveis relacionadas à dissipação de energia, o coeficiente de extinção fotoquímica (qP) apresentou aumento nos tratamentos com BiomaPhos®, sendo superiores ao tratamento sem inoculação. Já o coeficiente de extinção não fotoquímica (qN) apresentou comportamento inverso, com maior valor no tratamento sem inoculação (2,75), diferindo dos tratamentos com BiomaPhos®, que apresentaram menores valores. A temperatura foliar (T°leaf) e o déficit de pressão de vapor (VpdL) também foram influenciados pelo uso de BiomaPhos®, apresentando maiores valores nos tratamentos com inoculação, especialmente no tratamento com coinoculação, indicando possível alteração nas trocas gasosas e no balanço hídrico das plantas. A taxa de transporte de elétrons (ETR) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, embora tenha sido observado aumento numérico no tratamento com coinoculação.

Em relação às doses de P, não foram observadas diferenças significativas para nenhuma das variáveis analisadas, indicando que, nas condições do experimento, a variação na adubação fosfatada não foi suficiente para promover alterações nos parâmetros fotossintéticos. De forma geral, os resultados indicam que o uso de BiomaPhos® promoveu alterações pontuais nos processos fisiológicos das plantas, especialmente relacionados à regulação estomática e dissipação de energia, enquanto as doses de P não influenciaram significativamente o desempenho fotossintético das plantas de feijoeiro.

Tabela 2.2. Parâmetros fotossintéticos¹ de plantas de feijoeiros submetidas a tratamentos com BiomaPhos® (mL ha⁻¹) e doses de fósforo (0, 50 e 100% da recomendação), referentes ao segundo ciclo de cultivo.

Trat BiomaPhos®	A	Gs	Ci	E	WUE	CE	Fv'/Fm'	ΦPSII	qP	qN	ETR	VpdL	T°leaf
0	24,64 a ²	0,52 a	297,24 a	6,50 a	3,80 a	0,083 a	0,63 a	0,35 a	0,56 b	2,75 a	153,09 a	1,22 b	23,88 b
200	24,10 a	0,46 b	288,52 a	6,42 a	3,75 a	0,083 a	0,60 a	0,36 a	0,61 a	2,50 b	154,44 a	1,35 a	25,59 a
200+AZ+RT ³	25,10 a	0,50 ab	290,71 a	6,81 a	3,69 a	0,087 a	0,60 a	0,37 a	0,62 a	2,51 ab	161,90 a	1,33 a	25,9 a
Fósforo (P)													
0	24,73	0,52 a	295,66 a	6,75 a	3,68 a	0,084 a	0,63 a	0,36 a	0,57 a	2,71 a	156,89 a	1,28 a	25,02 a
50	24,40	0,48 a	291,28 a	6,46 a	3,78 a	0,084 a	0,60 a	0,36 a	0,59 a	2,55 a	155,62 a	1,31 a	25,12 a
100	24,70 a	0,48 a	289,54 a	6,53 a	3,78 a	0,086 a	0,60 a	0,37 a	0,62 a	2,51 a	160,93 a	1,33 a	25,24 a
F (Bioma)	0,57 ^{ns}	3,89*	3,13 ^{ns}	2,18 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,61 ^{ns}	3,23 ^{ns}	1,57 ^{ns}	7,30**	4,34*	1,73 ^{ns}	11,83**	54,78**
F (P)	0,07 ^{ns}	2,05 ^{ns}	1,51 ^{ns}	1,13 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,10 ^{ns}	2,70 ^{ns}	0,76 ^{ns}	3,08 ^{ns}	2,50 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,87 ^{ns}	0,58 ^{ns}
F (BiomaxP)	0,13 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,09 ^{ns}
C.V. (%)	9,38	10,17	3,04	7,43	8,22	12,54	5,94	7,37	7,40	9,00	7,41	5,33	2,02

¹ A = assimilação líquida de CO₂; gs = condutância estomática; Ci = concentração interna de CO₂; E = taxa de transpiração; WUE = eficiência do uso da água; CE = eficiência de carboxilação; Fv'/Fm' = fluorescência variável e a máxima; ΦPSII = rendimento quântico efetivo do Fotossistema II; qP = coeficiente de extinção fotoquímica; qN = coeficiente de extinção não-fotoquímica; ETR = taxa de transporte de elétrons; VpdL = **Déficit de Pressão de Vapor** T°leaf = temperatura foliar.

² Dados seguidos pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ** Significativo a 1%; * Significativo a 5%; ns = Não significativo a 5%.

³ Az= *Azospirillum* sp + Rt= *Rhizobium tropici*

Considerações

Os resultados obtidos evidenciam que os parâmetros fotossintéticos das plantas de feijoeiro apresentaram respostas distintas entre os ciclos de cultivo, refletindo a influência das condições ambientais e da disponibilidade de P sobre o desempenho fisiológico das plantas. De forma geral, observa-se que, no primeiro ciclo, as doses de P exerceram maior influência sobre as variáveis analisadas, enquanto, no segundo ciclo, os efeitos foram menos pronunciados, com maior destaque para a atuação do BiomaPhos® em ajustes fisiológicos específicos.

No primeiro ciclo, a redução significativa da assimilação líquida de CO₂ (A) na ausência de P confirma o papel essencial desse nutriente no metabolismo fotossintético. O P está diretamente envolvido na formação de ATP e na regeneração da ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP), sendo indispensável para o ciclo de Calvin. Dessa forma, sua limitação compromete a fixação de carbono, resultando em menor taxa fotossintética. O aumento de A nas doses intermediária e máxima de P indica que a disponibilidade do nutriente foi suficiente para sustentar o funcionamento adequado do aparato fotossintético. Em contrapartida, no segundo ciclo, a ausência de diferenças significativas para A e Ci sugere que as plantas não se encontravam sob limitação nutricional severa, possivelmente devido a efeitos residuais da adubação ou maior eficiência na absorção de P.

A concentração interna de CO₂ (Ci) apresentou comportamento variável entre os ciclos. No primeiro ciclo, valores mais elevados na ausência de P indicam limitação bioquímica da fotossíntese, em que a redução da assimilação leva ao acúmulo de CO₂ nos espaços intercelulares. Esse padrão evidencia que o principal fator limitante foi a utilização do CO₂ nos processos metabólicos, e não sua difusão. Já no segundo ciclo, a estabilidade da Ci entre tratamentos reforça a ausência de limitação metabólica significativa, indicando maior equilíbrio fisiológico das plantas.

A eficiência do uso da água (WUE) apresentou respostas complementares entre os ciclos. No primeiro, maiores valores foram observados na dose intermediária de P, sugerindo que níveis moderados do nutriente promovem melhor equilíbrio entre assimilação de carbono e perda de água. No segundo ciclo, embora não tenham sido observadas diferenças significativas, a manutenção dos valores de WUE, associada à redução da condutância estomática (gs) nos tratamentos com BiomaPhos®, indica ajustes fisiológicos que favorecem a conservação hídrica sem comprometer a assimilação de carbono. Esse desacoplamento entre gs e A sugere aumento da eficiência fisiológica das plantas inoculadas.

As variáveis relacionadas à fluorescência da clorofila evidenciam que a deficiência de P no primeiro ciclo comprometeu a eficiência fotoquímica do fotossistema II. A redução de F_v'/F_m' e $\Phi PSII$, associada à diminuição do coeficiente de extinção fotoquímica (qP), indica menor utilização da energia luminosa e maior risco de estresse fotoquímico. Em contrapartida, o aumento do coeficiente de extinção não fotoquímica (qN) nas maiores doses de P sugere maior dissipação de energia na forma de calor, atuando como mecanismo de proteção do aparato fotossintético. No segundo ciclo, a ausência de diferenças significativas nessas variáveis indica que o sistema fotossintético se manteve estável, sem sinais evidentes de estresse.

A taxa de transporte de elétrons (ETR) reforça esse comportamento, sendo reduzida na ausência de P no primeiro ciclo, o que evidencia limitação na geração de energia para os processos metabólicos. Já no segundo ciclo, embora não significativa, a tendência de aumento da ETR nos tratamentos com coinoculação pode indicar maior atividade fotoquímica, ainda que de forma sutil.

Em relação ao BiomaPhos®, seus efeitos foram mais consistentes no segundo ciclo, atuando principalmente na modulação de variáveis associadas ao estado hídrico e à regulação estomática. A redução da g_s nos tratamentos inoculados, sem impacto na assimilação de carbono, sugere um ajuste fisiológico que favorece a economia de água. Esse comportamento é reforçado pelo aumento da temperatura foliar ($T^{\circ}leaf$) e do déficit de pressão de vapor ($VpdL$), indicando menor resfriamento evaporativo em função da redução da transpiração. Esses ajustes podem representar uma estratégia adaptativa das plantas para otimizar o uso da água.

Além disso, alterações nos coeficientes qP e qN nos tratamentos com BiomaPhos® indicam maior eficiência no uso da energia luminosa, com maior proporção de centros de reação abertos e menor necessidade de dissipação térmica. Esse padrão sugere melhoria no desempenho fotoquímico, mesmo na ausência de incrementos na taxa fotossintética.

A ausência de interação significativa entre os fatores em ambos os ciclos indica que os efeitos do P e do BiomaPhos® ocorreram de forma independente. Enquanto o P atuou diretamente sobre os processos bioquímicos da fotossíntese, especialmente no primeiro ciclo, o BiomaPhos® influenciou principalmente mecanismos indiretos, relacionados à regulação fisiológica e ao equilíbrio hídrico das plantas.

De forma integrada, os resultados demonstram que o P é o principal fator determinante da atividade fotossintética em condições de limitação nutricional, enquanto o BiomaPhos® atua como modulador de processos fisiológicos secundários, contribuindo

para maior eficiência no uso de recursos, especialmente água e energia. Essa complementaridade sugere que o uso de bioinsumos pode trazer benefícios mais evidentes em condições de estresse ou em sistemas com menor disponibilidade de nutrientes, enquanto em condições adequadas de fertilidade seus efeitos tendem a ser mais sutis.

4.3 Fracionamento de P

Fósforo Total e Fósforo Disponível

Em experimentos de campo o P total (P_T) do solo (Figura 3.1) apresentou efeito significativo do fator BiomaPhos® ($p = 0,0465$) e da interação com as doses de P ($p = 0,0213$), enquanto as doses de fertilizante isoladamente não promoveram diferenças estatísticas. O tratamento com maior nível de BiomaPhos® (200 mL/ha BiomaPhos® + *R. tropici* + *Azospirillum* sp.) apresentou a maior média geral de P_T (1146,9 mg kg⁻¹), superando o tratamento sem inoculação (0 mL/ha BiomaPhos®: 1045,0 mg kg⁻¹).

O destaque ocorreu para o tratamento sem adubação fosfatada (P0), em que o tratamento de T7 atingiu média de 1252,97 mg kg⁻¹, valor significativamente superior aos tratamentos sem inoculação (~1020 - 1032 mg kg⁻¹). Esse resultado indica maior mobilização de formas lábeis de P do solo promovida pela atividade microbiana.

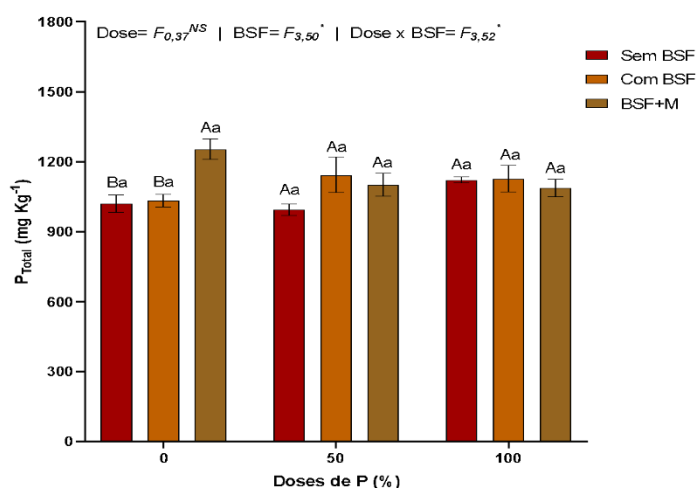


Figura 3.1. Interação entre doses de BiomaPhos® e níveis de recomendação de fósforo sobre fósforo total do solo. Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de fósforo dentro de cada tratamento BiomaPhos®, enquanto letras maiúsculas comparam tratamentos dentro de cada nível de fósforo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

Para o P disponível (Figura 3.2), observou-se efeito da interação ($p = 0,0006$). Quando não houve adição de P (P0), o tratamento T7 apresentou média de 91,55 mg kg⁻¹, praticamente o dobro do tratamento T1 (50,23 mg kg⁻¹). Já nos tratamentos T8 e T9 os valores decresceram entre os tratamentos, indicando redução do efeito relativo do bioinsumo quando o nutriente já se encontra prontamente disponível.

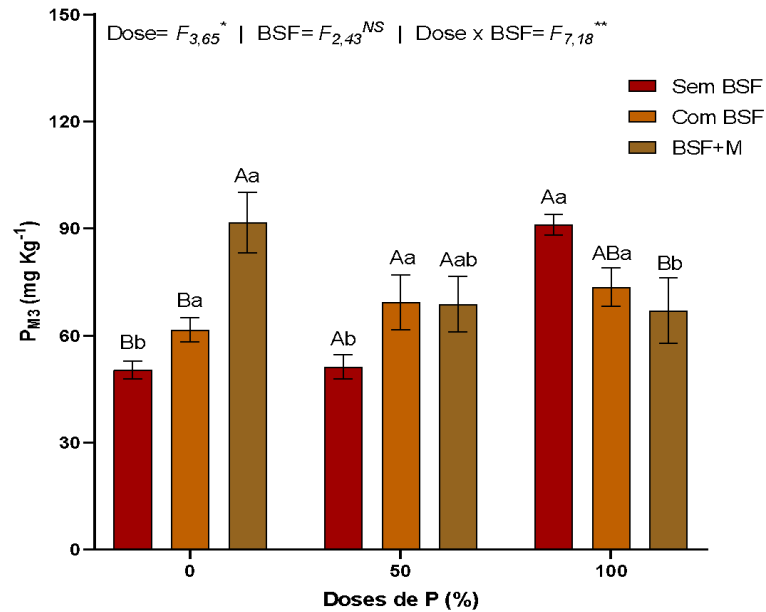


Figura 3.2. Interação entre doses de BiomaPhos® e níveis de recomendação de fósforo sobre o fósforo disponível. Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de fósforo dentro de cada tratamento BiomaPhos®, enquanto letras maiúsculas comparam tratamentos dentro de cada nível de fósforo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

Transformações nas Frações de Fósforo do Solo

O P inorgânico (P_i) moderadamente lábil (P_{iOH}) (Figura 3.3) foi influenciado somente pelo BiomaPhos® ($p = 0,0002$). O tratamento de 200 mL/ha BiomaPhos® apresentou a maior média (56,77 mg kg⁻¹), representando incremento superior a 65% em relação ao tratamento sem inoculação (33,83 mg kg⁻¹). Esse resultado demonstra aumento da conversão de formas menos disponíveis em frações potencialmente absorvíveis pelas plantas.

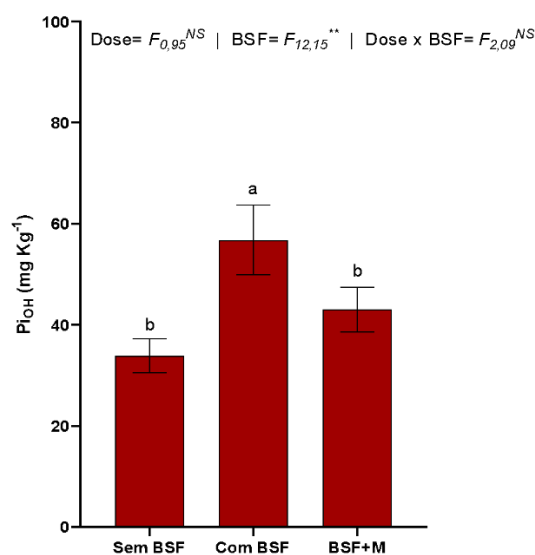


Figura 3.3. Teor de fósforo inorgânico (P_{iOH}) no solo em função das doses de BiomaPhos®. Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de BiomaPhos®, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

Resultados semelhantes foram observados para o P orgânico (Po-OH), com efeito significativo do BiomaPhos® e da interação ($p = 0,0009$). O tratamento T7 se destacou com média de $397,01 \text{ mg kg}^{-1}$, superior aos tratamentos T1 ($327,09 \text{ mg kg}^{-1}$) e T4 ($316,16 \text{ mg kg}^{-1}$), sugerindo intensificação do ciclo microbiano de mineralização e reciclagem do P orgânico (Figura 3.4).

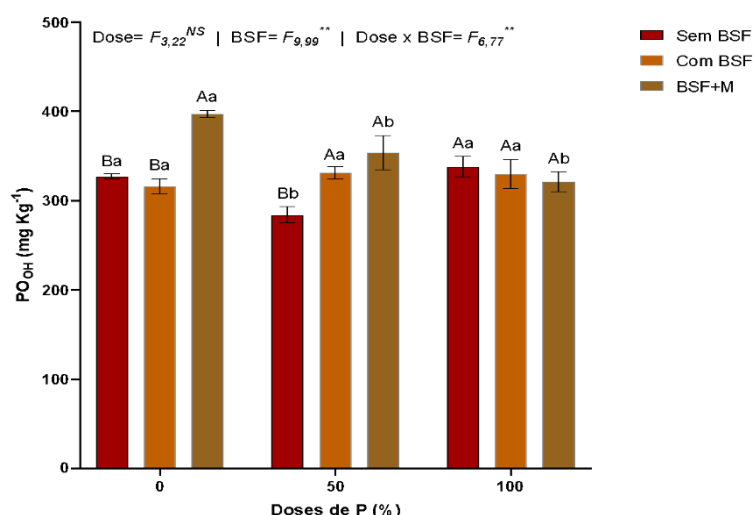


Figura 3.4. Interação entre doses de BiomaPhos® e níveis de recomendação de fósforo sobre o fósforo orgânico extraído por hidróxido (Po-OH). Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de fósforo dentro de cada tratamento BiomaPhos®, enquanto letras maiúsculas comparam tratamentos dentro de cada nível de fósforo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

A fração P-HCl também apresentou interação significativa, com maior média observada no tratamento T5 ($24,11 \text{ mg kg}^{-1}$), indicando maior mobilização de formas ligadas ao cálcio (Figura 3.5).

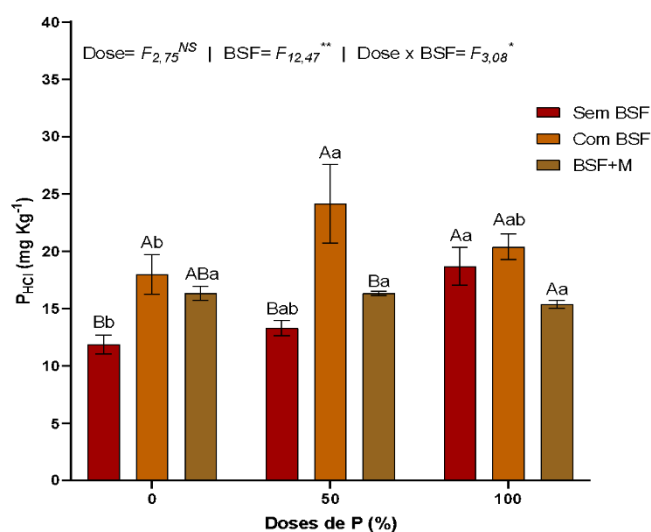


Figura 3.5. Interação entre doses de BiomaPhos® e níveis de recomendação de fósforo sobre a fração P-HCl. Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de fósforo dentro de cada tratamento BiomaPhos®, enquanto letras maiúsculas comparam tratamentos dentro de cada nível de fósforo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

Importante destacar que o P ocluso não apresentou diferenças significativas entre tratamentos, com média geral de 633,17 mg kg⁻¹, demonstrando que o BiomaPhos® atuou preferencialmente sobre frações lábeis e moderadamente lábeis, sem alterar reservatórios altamente recalcitrantes.

Sorção de Fósforo e Saturação do Solo

A capacidade de sorção de P (Psor) (Figura 3.6) foi significativamente influenciada pelas doses de P aplicadas ($F = 4,20$; $p \leq 0,05$) e pelo uso do produto contendo microrganismos solubilizadores de P (BSF) ($F = 4,77$; $p \leq 0,05$), enquanto não foi observada interação significativa entre os fatores (Dose de P $\times$ BSF; $F = 0,71$; $p > 0,05$). A ausência de interação indica que os efeitos das doses de P e da inoculação microbiana ocorreram de forma independente sobre os processos de retenção de P no solo.

Observou-se aumento significativo da sorção P em tratamento que receberam a dose P50 com valor médio próximo a 19%, diferindo estatisticamente dos tratamentos contendo P0 e P100, cujas médias permaneceram em torno de 16 - 17%. Esse comportamento sugere que a adição moderada de P promove maior ocupação dos sítios reativos do solo, aumentando temporariamente a retenção do nutriente por mecanismos de adsorção específica por óxidos de ferro e alumínio, predominantes em solos tropicais altamente intemperizados.

Por outro lado, a redução da sorção observada em tratamentos com a maior dose de P100 indica possível aproximação da saturação dos sítios de adsorção, resultando em menor retenção do nutriente.

A capacidade de sorção de P também foi influenciada pelo BiomaPhos® ($p = 0,0181$). O tratamento 200 mL/ha BiomaPhos® + *R. tropici* + *Azospirillum* sp., apresentou maior média (19,09%), indicando modificações nos equilíbrios de adsorção–dessorção do P no solo. O efeito significativo do BSF demonstra que a atividade microbiana também contribuiu para modificar os processos de sorção. BSF são capazes de alterar a química da rizosfera por meio da liberação de ácidos orgânicos, prótons e metabólitos quelantes, promovendo competição com íons fosfato pelos sítios de adsorção e reduzindo parcialmente a energia de ligação do P às superfícies minerais. Como consequência, ocorre maior dinâmica entre as fases adsorvida e disponível do nutriente.

Os resultados indicam que o BiomaPhos® atua não apenas aumentando a solubilização do P, mas também modulando o equilíbrio adsorção–dessorção no solo. Essa alteração contribui para maior eficiência de uso do fertilizante fosfatado,

especialmente em níveis intermediários de P. Em conjunto com os resultados de fracionamento e aumento do P disponível observados anteriormente, a redução relativa da sorção em condições de maior disponibilidade nutricional sugere que o BiomaPhos® favorece a mobilização de formas moderadamente lábeis de P, ampliando o fluxo do nutriente para a solução do solo sem promover acúmulo excessivo em frações fortemente adsorvidas.

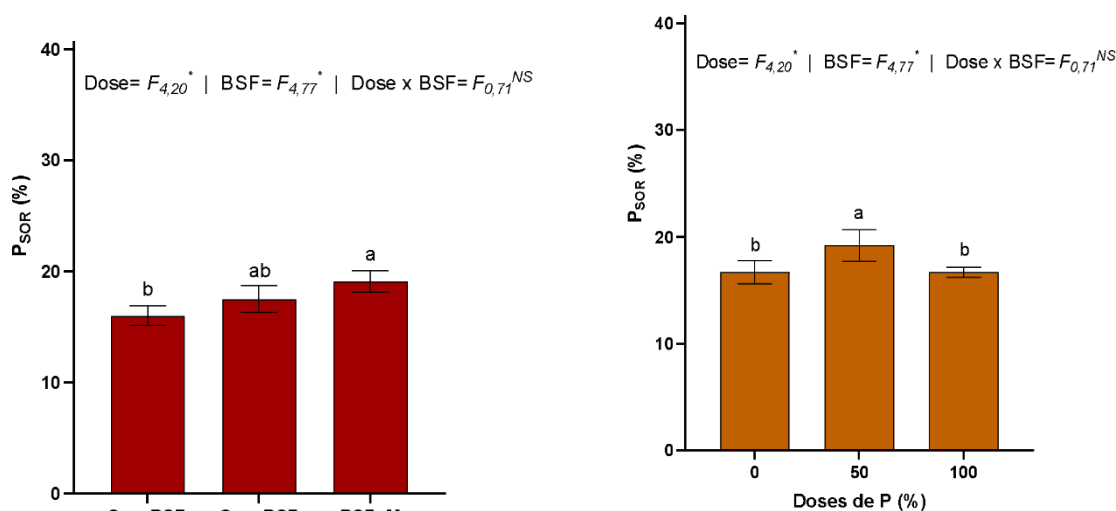


Figura 3.6. Teor de sorção de P (P_{SOR}) no solo em função das doses de P e BSF. Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de fósforo e níveis de BiomaPhos®, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

O índice DPS (grau de saturação por P) (Figura 3.7) apresentou efeito significativo das doses de P e da interação ($p = 0,0004$). O maior valor foi observado no tratamento T7 (6,07%), refletindo elevada saturação sob alta adubação mineral sem inoculação. Entretanto, sob menor disponibilidade de P, o BiomaPhos® elevou o DPS de forma equilibrada, evidenciando aumento da eficiência de disponibilização sem necessidade de maiores aportes fertilizantes. O grau de saturação por P determinado pelo extrator Mehlich-3 (DPS-M3) foi significativamente influenciado pelas doses de P ($p \leq 0,01$) e pela interação entre doses e o BiomaPhos® ($p \leq 0,01$), enquanto o efeito isolado do BSF não foi significativo. Esse resultado indica que a dinâmica da saturação dos sítios de adsorção do solo depende fortemente da combinação entre adubação mineral e atividade microbiana.

De maneira geral, o aumento da dose de P elevou os valores de DPS-M3, com a maior saturação observada sob P100. Esse comportamento era esperado, uma vez que maiores aportes de P promovem maior ocupação dos sítios reativos de óxidos de Fe e Al,

aumentando a proporção de P potencialmente disponível na solução do solo. Entretanto, a interação significativa revela que a inoculação microbiana modulou esse processo. Em condições de menor dose de P, os tratamentos com BSF apresentaram valores de DPS-M3 superiores ao manejo sem inoculação, indicando maior mobilização de P previamente adsorvido. Esse efeito sugere que a atividade microbiana favorece a dessorção de P ou reduz sua energia de ligação às superfícies minerais, alterando o equilíbrio entre frações adsorvidas e lábeis.

Sob elevada adubação fosfatada, as diferenças entre tratamentos tenderam a diminuir, indicando que, em solos com maior saturação inicial, o efeito adicional da inoculação é menos pronunciado. O aumento do DPS-M3 em tratamentos com BSF sob doses reduzidas de P indica potencial de melhoria na eficiência de uso do fertilizante, uma vez que maior fração do P total permanece em formas acessíveis às plantas.

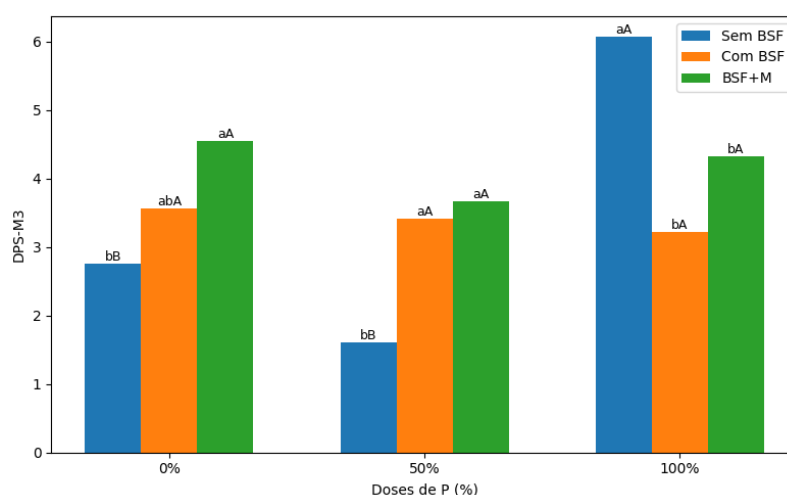


Figura 3.7. Interação entre doses de BiomaPhos® e níveis de recomendação de fósforo sobre o grau de saturação por fósforo (DPS – NCM3). Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de fósforo dentro de cada tratamento BiomaPhos®, enquanto letras maiúsculas comparam tratamentos dentro de cada nível de fósforo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

O teor de P legado do solo (Figura 3.8) foi significativamente influenciado pelo uso do BSF ($F = 9,72$; $p \leq 0,01$) e pela interação entre BSF e doses de P ($F = 11,87$; $p \leq 0,01$), enquanto o efeito isolado das doses de fertilização fosfatada não foi significativo ($F = 2,85$; $p > 0,05$). Esses resultados indicam que, a dinâmica do P acumulado no solo foi predominantemente controlada pela atividade biológica, e não apenas pelo aporte direto de fertilizante mineral. Na ausência de fertilização fosfatada (0%), a aplicação de BSF associada à coinoculação microbiana (BSF+M) promoveu o maior valor de P legado, atingindo aproximadamente 9,8 unidades, diferindo significativamente do tratamento sem BSF e do tratamento apenas com BSF. Esse resultado demonstra elevada capacidade

dos microrganismos em mobilizar estoques de P previamente acumulados no solo, reforçando o papel dos solubilizadores na ativação do P legado.

Na dose P50, observou-se redução dos valores de P legado no tratamento sem inoculação, enquanto os tratamentos com BSF mantiveram níveis significativamente superiores. Por outro lado, sob a maior dose de P100, as diferenças entre tratamentos foram reduzidas, indicando que o aumento da disponibilidade imediata de P proveniente da adubação mineral diminui a atividade microbiana para mobilização do P legado. Nessa condição, a contribuição relativa do BSF torna-se menos pronunciada, uma vez que o sistema apresenta menor limitação nutricional.

A interação significativa observada evidencia que o efeito do BSF depende diretamente do nível de P, sendo mais expressivo em condições de baixa ou moderada disponibilidade de P. Esse padrão confirma que microrganismos solubilizadores atuam prioritariamente sobre frações moderadamente estáveis do solo, promovendo transição do P legado para compartimentos mais dinâmicos do ciclo biogeoquímico.

Destaca-se ainda que a maior recuperação de P legado sob coinoculação pode estar associada à atuação complementar dos microrganismos envolvidos. Enquanto bactérias solubilizadoras aumentam a dessorção e solubilização do P mineral, microrganismos promotores de crescimento vegetal estimulam o desenvolvimento radicular e a atividade rizosférica, ampliando a exploração do solo e intensificando os fluxos de mineralização-imobilização do nutriente.

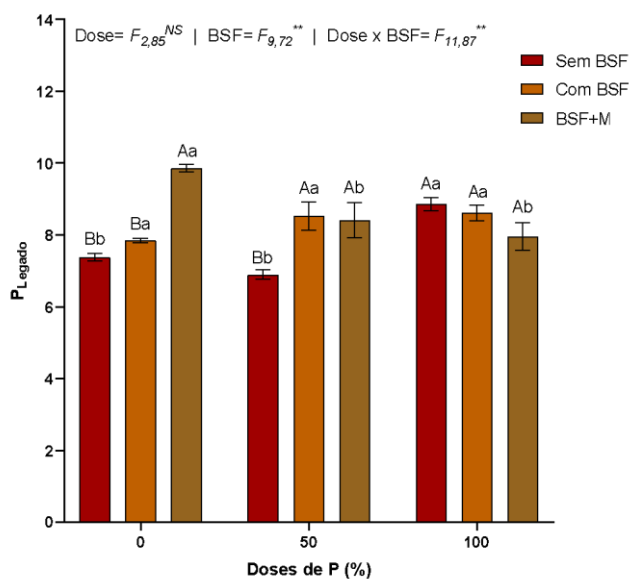


Figura 3.8. Interação entre doses de BiomaPhos® e níveis de recomendação de fósforo sobre Legado de fósforo (P_{Legado}) (%) no solo em função das doses de P e de BiomaPhos®. Barras representam médias. Letras minúsculas comparam níveis de fósforo dentro de cada tratamento BiomaPhos®, enquanto letras maiúsculas comparam tratamentos dentro de cada nível de fósforo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$; NS – não significativo a $p < 0,05$).

Considerações

Os resultados obtidos evidenciam que a dinâmica do P no solo foi fortemente influenciada pela interação entre a inoculação com BiomaPhos® e as doses de fertilização fosfatada, indicando que os processos de disponibilidade, transformação e retenção do nutriente são controlados por mecanismos biogeoquímicos interdependentes. De forma geral, a maior parte das variáveis apresentou efeito significativo da interação, demonstrando que a eficiência do uso do P não depende exclusivamente da adubação mineral, mas também da atividade microbiana no solo.

O aumento do P_T nos tratamentos com maior dose de BiomaPhos®, especialmente na ausência de adubação fosfatada, evidencia a capacidade dos microrganismos em mobilizar formas previamente indisponíveis do nutriente. Esse comportamento sugere atuação direta sobre frações lábeis e moderadamente lábeis do solo, promovendo a liberação de P retido em complexos minerais ou orgânicos. Esse efeito foi ainda mais evidente no P disponível, no qual os tratamentos inoculados apresentaram valores superiores, principalmente sob baixa disponibilidade de P, indicando maior eficiência na conversão de formas não disponíveis em formas assimiláveis pelas plantas. Entretanto, à medida que a dose de P mineral foi elevada, observou-se redução do efeito relativo do BiomaPhos®, indicando que, em condições de alta disponibilidade de P, a contribuição da atividade microbiana tende a ser menos expressiva. Esse comportamento reforça que microrganismos solubilizadores atuam principalmente em condições de limitação nutricional, onde há maior demanda por mecanismos de mobilização de nutrientes. A análise do fracionamento do P corrobora esses resultados, demonstrando que o BiomaPhos® promove alterações importantes na distribuição das frações do nutriente no solo.

O aumento significativo do P inorgânico moderadamente lábil ($P_i\text{-OH}$) indica maior conversão de formas menos disponíveis em compartimentos potencialmente acessíveis, refletindo a atuação microbiana na solubilização de fosfatos ligados a óxidos de ferro e alumínio. Da mesma forma, o incremento observado no P orgânico ($P_o\text{-OH}$) sugere intensificação dos processos de ciclagem biológica, com maior mineralização e imobilização do P orgânico, contribuindo para a manutenção do nutriente em formas dinâmicas no sistema.

A ausência de efeito sobre o P ocluso reforça que a atuação do BiomaPhos® ocorre predominantemente sobre frações mais reativas do solo, sem interferir significativamente nos reservatórios mais estáveis e de baixa disponibilidade. Esse padrão é esperado, uma

vez que frações oclusas apresentam elevada estabilidade química e menor suscetibilidade à ação microbiana no curto prazo, principalmente quando essas são bactérias.

Outro aspecto relevante foi a modulação da sorção de P no solo. Os resultados indicam que tanto as doses de P quanto a inoculação influenciaram a capacidade de retenção do nutriente, embora de forma independente. O aumento da sorção em doses intermediárias de P sugere maior ocupação dos sítios de adsorção, enquanto a redução observada em doses elevadas indica aproximação da saturação desses sítios. Paralelamente, o efeito do BiomaPhos® sobre a sorção evidencia que a atividade microbiana pode alterar os equilíbrios de adsorção–dessorção, possivelmente por meio da liberação de ácidos orgânicos e compostos quelantes, que competem com o fosfato pelos sítios de ligação no solo.

Essa modulação também se refletiu no grau de saturação por P (DPS), no qual a interação entre os fatores demonstrou que o BiomaPhos® pode aumentar a fração de P disponível sem necessidade de maiores aportes de fertilizante. Em condições de baixa e média disponibilidade de P, os tratamentos inoculados apresentaram maior saturação relativa, indicando maior eficiência na mobilização do nutriente previamente adsorvido. Por outro lado, em altas doses de P, as diferenças entre tratamentos foram reduzidas, sugerindo limitação do efeito microbiano em sistemas já saturados.

Os resultados relacionados ao P legado reforçam esse comportamento, evidenciando que a atividade microbiana desempenha papel central na mobilização de estoques acumulados no solo. A maior recuperação de P legado nos tratamentos com coinoculação, especialmente na ausência de adubação fosfatada, demonstra o potencial dos microrganismos em acessar frações historicamente acumuladas e pouco disponíveis. Esse efeito é particularmente relevante em sistemas agrícolas tropicais, onde grandes quantidades de P encontram-se imobilizadas em formas não prontamente acessíveis às plantas.

Além disso, a redução do efeito do BiomaPhos® sob altas doses de P indica que a disponibilidade imediata do nutriente diminui a necessidade de mobilização de estoques, reduzindo a atividade microbiana associada a esses processos. Esse resultado reforça a importância de estratégias de manejo que integrem o uso de fertilizantes e bioinsumos, visando maior eficiência no uso do P.

De forma geral, os resultados demonstram que o BiomaPhos® atua de maneira integrada na dinâmica do P, promovendo a solubilização, redistribuição entre frações, redução da sorção e aumento da disponibilidade do nutriente. Esses efeitos são mais

pronunciados em condições de baixa a média disponibilidade de P, onde a atividade microbiana exerce papel fundamental na ciclagem e disponibilização do nutriente. Assim, o uso de microrganismos solubilizadores se apresenta como estratégia promissora para aumentar a eficiência do uso do P em sistemas agrícolas, contribuindo para a sustentabilidade do manejo da fertilidade do solo.

4.4 Avaliação da atividade enzimática do solo

Casa de vegetação – primeiro experimento

No primeiro experimento de casa de vegetação, a atividade da enzima arilsulfatase apresentou efeito interativo entre os fatores (Biomaphos® x Adubação fosfatada) para ambos os tipos de solo, com alto teor de P (S1) e com baixo teor de P (S2). Para S1 (Figura 4.1), o tratamento T11 teve o maior valor, com 60,4 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} . Já os tratamentos com menores valores foram T1, T8, T10 e T12 que não diferiram estatisticamente de T3 que apresentou menor atividade da enzima, com 25,9 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} . No S2 (Figura 4.2), o T8 foi o tratamento com a maior atividade da enzima, com 132,5 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , se destacando entre os demais tratamentos. Com 55 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , tratamento T9 foi aquele com o menor valor de atividade enzimática, e estatisticamente igual com o T5 (67,2 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1}).

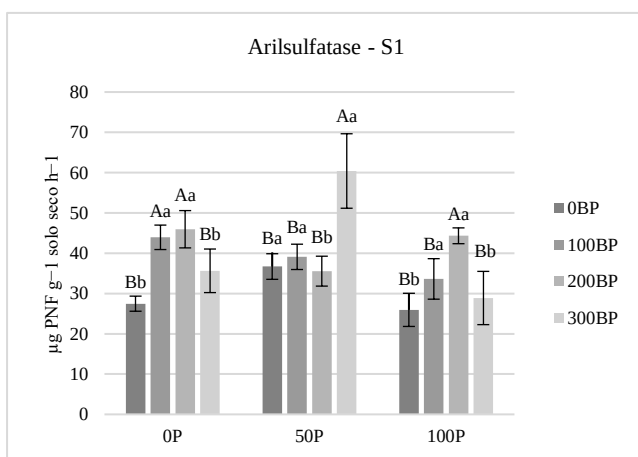


Figura 4.1. Atividade enzimática da arilsulfatase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos®(A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos®(A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

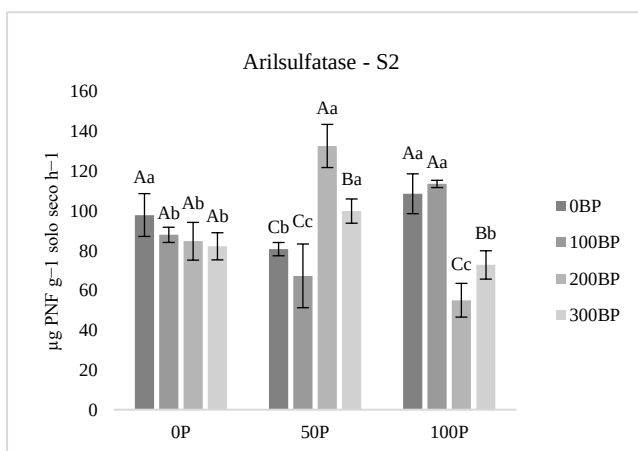


Figura 4.2. Atividade enzimática da arilsulfatase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos®(A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos®(A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Em relação a atividade da betaglicosidase foi observado o efeito da interação entre os fatores analisados. No S1 (Figura 4.3) o tratamento T3 foi aquele com maior atividade enzimática, 1162,4 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , sendo estatisticamente igual ao T2 com 1190,24 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} . Os tratamentos T4 e T5 foram aqueles com baixa atividade enzimática, e com diferença estatística em relação aos demais tratamentos, com valores de 372,9 e 361,4 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , respectivamente. É importante observar que os tratamentos que não receberam o Biomaphos® foram aqueles mais expressivos independentemente da quantidade de adubação fosfatada. Quando o solo analisado foi o S2 (Figura 4.4), os tratamentos T11 e T12 obtiveram os maiores valores de atividades, sendo eles 1183,5 e 1176,9 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , respectivamente. O tratamento T5 apresentou a menor atividade enzimática, com 875,4 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , sendo esse valor estatisticamente igual àqueles apresentados pelos tratamentos T6 e T7, com atividade de 898,13 e 881,4 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , respectivamente.

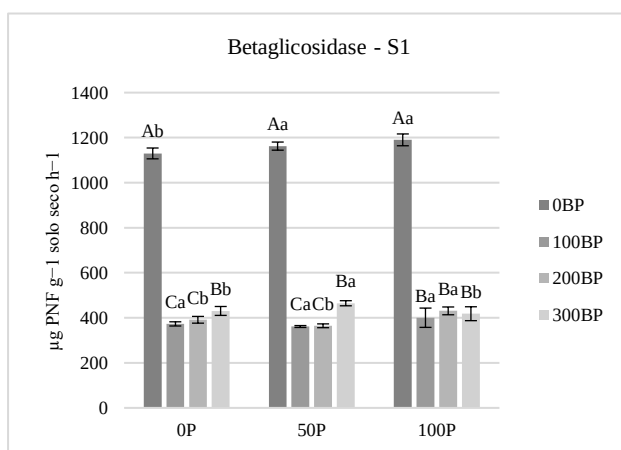


Figura 4.3. Atividade enzimática da betaglicosidase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

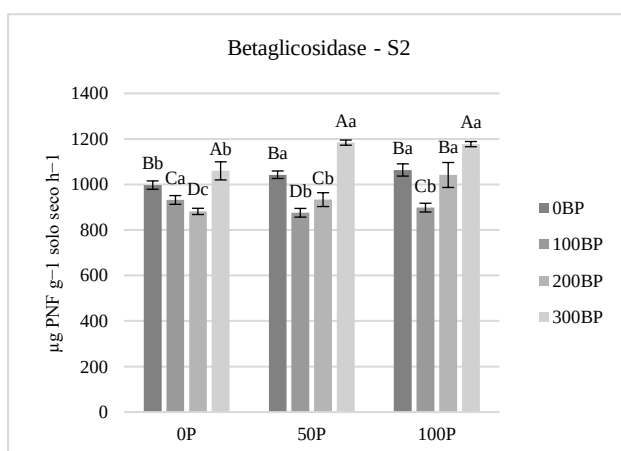


Figura 4.4. Atividade enzimática da betaglicosidase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Em relação a atividade enzimática da fosfatase, apresentou uma pequena variação no efeito da interação entre os fatores, garantindo que o T11 foi o tratamento que estatisticamente foi maior que os demais, com atividade de $254,0 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.5), sendo esse tratamento também sendo o quando se observa apenas o segundo nível fator P (P50). O T4 apresentou o maior valor nominal de atividade, porém não foi estatisticamente diferente daqueles tratamentos que não receberam adubação fosfatada (T1, T4, T7 e T10). O menor valor de atividade da enzima foi observado no T12 com valor de $209,8 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, no entanto não foi estatisticamente diferente dos demais tratamentos que receberam a maior dose de P (P100), T3, T6 e T9. Sendo ainda estatisticamente igual ao tratamento T10. No S2 (Figura 4.6), mesmo havendo interação entre os fatores não houve um tratamento que se destacou estatisticamente em relação aos demais. Quando observamos a interação os tratamentos T10, T11 e T6 foram os maiores, porém estatisticamente iguais, com valores de 642,6, 621,5 e 659,0 $\mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, respectivamente. O T4 foi aquele com menor valor de atividade, com $286,4 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$.

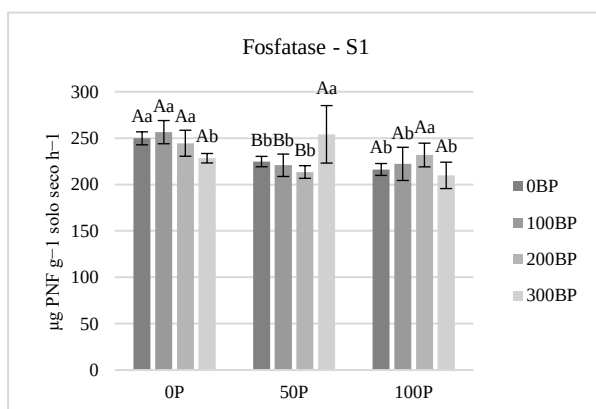


Figura 4.5. Atividade enzimática da fosfatase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

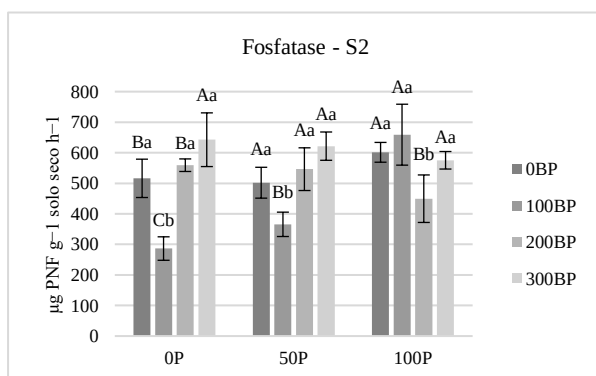


Figura 4.6. Atividade enzimática da fosfatase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator BiomaPhos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator BiomaPhos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Os resultados referentes à atividade da enzima urease, no S1, não indicaram interação entre os fatores Biomaphos® e dose de P (Figura 4.7), não havendo assim diferença estatística entre os tratamentos avaliados. Os tratamentos fora das interações também não foram diferentes estatisticamente.

Já na avaliação da atividade da urease no S2, foi observado interação entre os fatores Biomaphos® e dose de P (Figura 4.8). Os tratamentos T11 e T12 foram os que apresentaram as maiores atividades sendo iguais estatisticamente, com 9,9 e 10,2 $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, respectivamente. A menor atividade observada foi em T9 sendo a atividade de 3,2 $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, sendo estatisticamente diferente dos outros tratamentos.

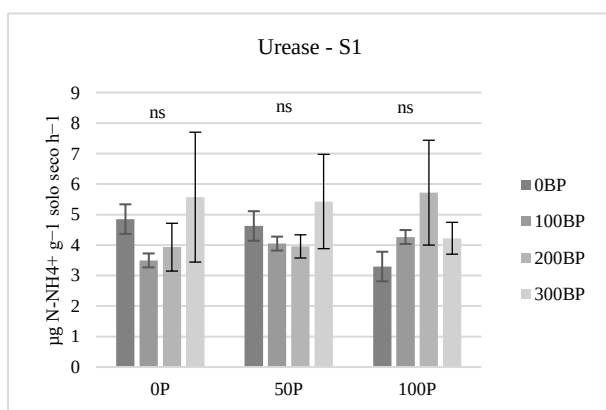


Figura 4.7. Atividade enzimática da urease, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão. ns = De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), as médias não apresentaram diferença significativa.

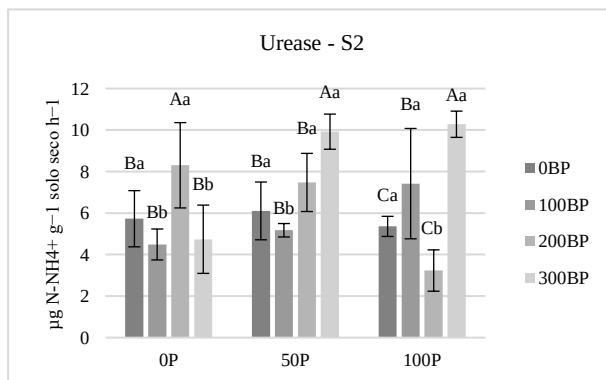


Figura 4.8. Atividade enzimática da urease, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A atividade enzimática da enzima desidrogenase, apresentou interação entre os fatores avaliados para ambos os tipos de solo. No S1 o tratamento T11 teve o maior valor de atividade, 90,0 $\mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.9), se destacando estatisticamente dos demais tratamentos. Já o tratamento T9 foi o maior entre os tratamentos que receberam a maior dose de P (T3, T6, T9 e T12), com 84,3 $\mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$. O tratamento T3 teve a menor atividade registrada, 54,3 $\mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$. No S2 (Figura 4.10),

a maior atividade observada foi 121,9 $\mu\text{g NFT g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , valor referente ao T12, sendo esse valor estatisticamente igual aqueles observado nos tratamentos T10 e T11, com valores de 117,9 e 119,2 $\mu\text{g NFT g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , respectivamente. Nesse mesmo tipo de solo o T7 foi apresentou a menor valor referente à atividade enzimática, 64,1 $\mu\text{g NFT g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , sendo esse valor estatisticamente quando se observa apenas os tratamentos que não receberam adubação fosfatada. igual diferindo dos demais tratamentos.

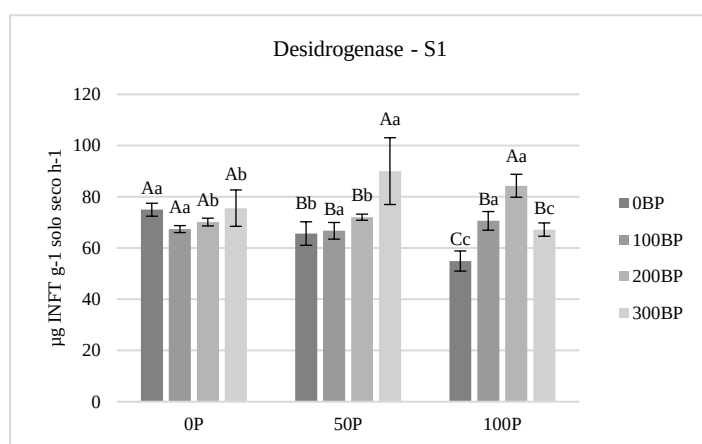


Figura 4.9. Atividade enzimática da desidrogenase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

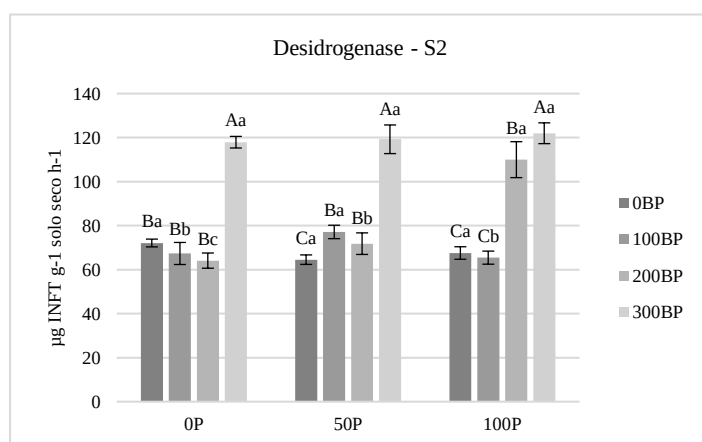


Figura 4.10. Atividade enzimática da desidrogenase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Nas análises de quantificação de FDA foi observada interação significativa entre os fatores avaliados. No S1 (Figura 4.11), o tratamento T9 apresentou a maior atividade, com valor de 1854,7 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco, sendo estatisticamente diferente dos demais. A menor atividade ocorreu no T4 com 1292,7 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco, estatisticamente diferente de todos os demais. No S2 (Figura 4.12), o T12 com 1918,3 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco, foi o maior valor de atividade observado, porém estatisticamente igual aos

tratamentos T3, T5, T6, T7 e T8. O tratamento T10 apresentou o menor valor, com 1665,2 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco, diferentes estatisticamente dos demais.

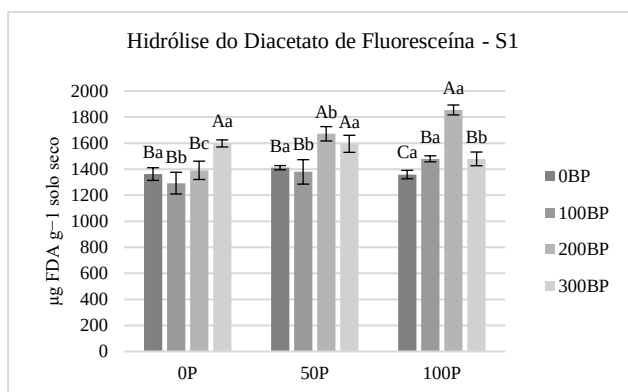


Figura 4.11. Hidrólise do diacetato de fluoresceína, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

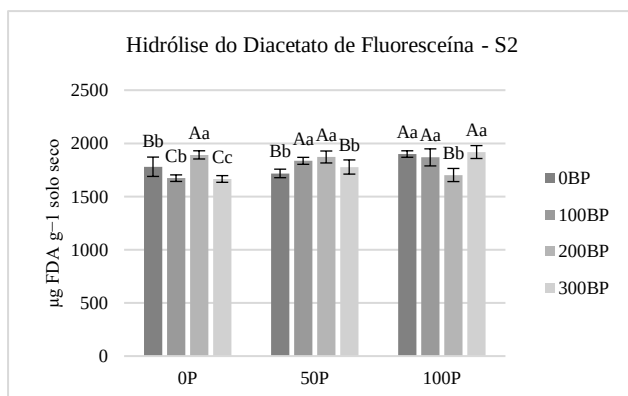


Figura 4.12. Hidrólise do diacetato de fluoresceína, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A avaliação da RBS indicou que no S1 o tratamento T3 foi aquele com o maior valor de atividade de estatisticamente diferente dos demais (Figura 4.13), com valor de 19,76 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ solo dia^{-1} . Já os tratamentos T2 e T12 foram os tratamentos com os menores valores de atividade, com 8,0 e 8,1 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ solo dia^{-1} , respectivamente. No S2 (Figura 4.14), o tratamento T10 apresentou o maior valor 17,1 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ solo dia^{-1} , sendo igual estatisticamente aos T1 e T7. Já o menor valor de atividade enzimática foi de 9,8 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ solo dia^{-1} , referente ao T3.

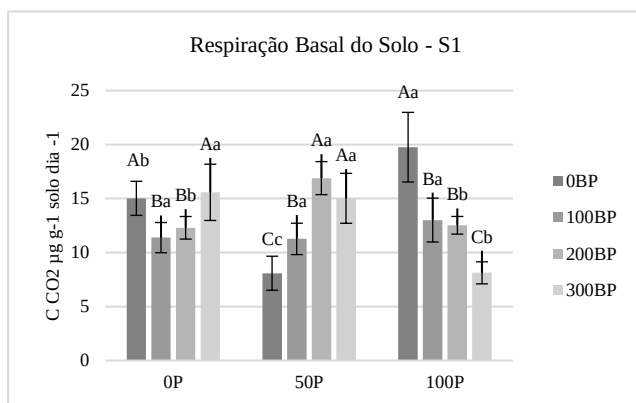


Figura 4.13. Respiração basal do solo, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão. As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

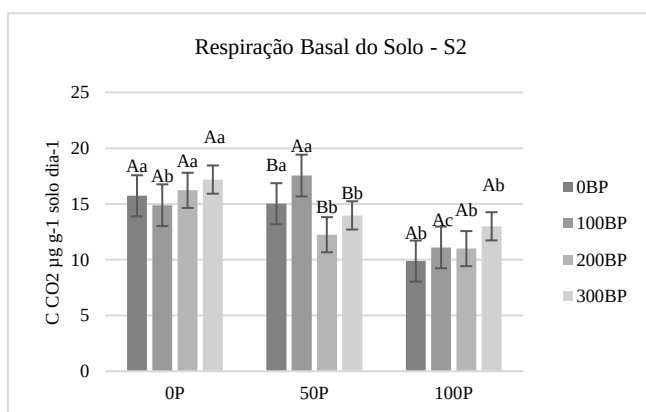


Figura 4.14. Respiração basal do solo, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Seguindo para análise de CBM, foi observado que no S1 o T3 foi o tratamento com valor mais expressivo (Figura 4.15), com valor de $861,5 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, estatisticamente diferente dos demais tratamentos. O T12 foi aquele com menor valor observado, com $805,5 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, sem diferença significativa com os tratamentos T5, T6, T8, T9 e T11. No S2 (Figura 4.16), o tratamento com maior CBM foi o T8 com $916,3 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, mas sem diferença estatística com os tratamentos T4, T5, T6, T7 e T9. Já no S2 (Figura 4.16), o T12 teve o menor valor de CBM, com $807,4 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, estatisticamente diferente dos demais.

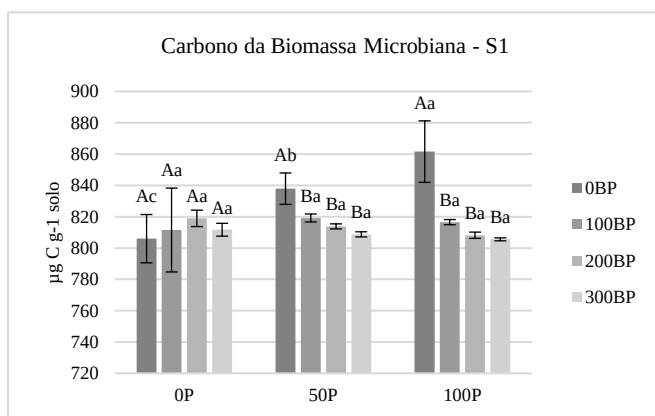


Figura 4.15. Carbono da biomassa microbiana, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

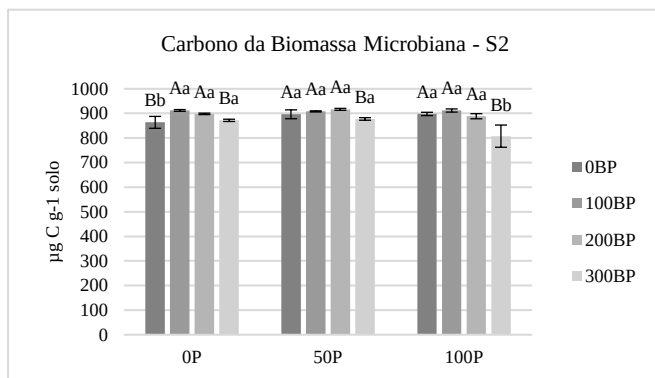


Figura 4.16. Carbono da biomassa microbiana, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Nos resultados de NBM para o S1 e S2 houve interação entre os fatores testados. No S1 (Figura 4.18) o tratamento T12 foi o tratamento com $20,2 \mu\text{g N g}^{-1}$ solo, estatisticamente diferente dos demais. Já o tratamento T6 apresentou o menor valor, com $0,4 \mu\text{g N g}^{-1}$ solo, sem diferença significativa com T9. No T5 não houve quantidades de NBM.

No S2, o T3 foi o tratamento que continha a maior quantidade de NBM, com $25,5 \mu\text{g N g}^{-1}$ solo, sem diferença estatística com o T4. O menor valor de NBM observado foi de $8,4 \mu\text{g N g}^{-1}$, referente ao T12 teve o menor valor de NBM.

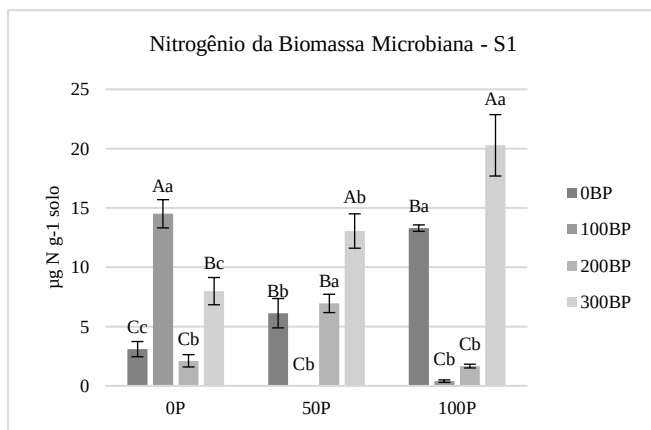


Figura 4.17. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo com alto teor de P (S1), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

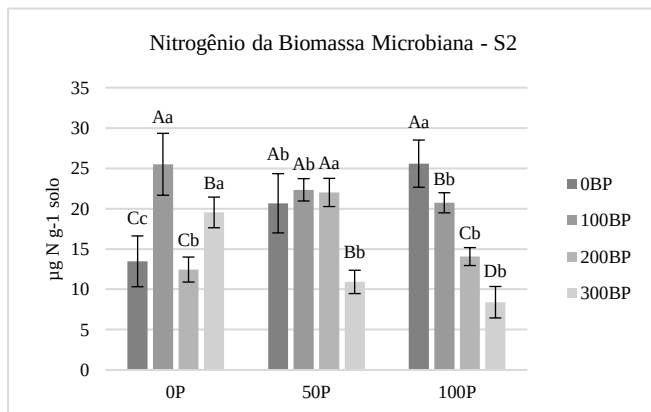


Figura 4.18. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao primeiro experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Casa de Vegetação – segundo experimento

No segundo experimento de casa de vegetação, foi observada interação significativa entre os fatores tanto no S1, quanto em S2. O T3 apresentou o maior valor de atividade da enzima arilsulfatase, com $76,69 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.19). Enquanto os menores valores foram $7,73$, $12,82$ e $14,58 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, referentes aos tratamentos T8, T7 e T9, respectivamente. Já no S2 (Figura 4.20), o maior valor de atividade foi do T8, com $17,4 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ e estatisticamente igual ao T7, com valor de $15,31 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$. O menor valor foi aquele observado em T12, com atividade enzimática de $3,6 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$.

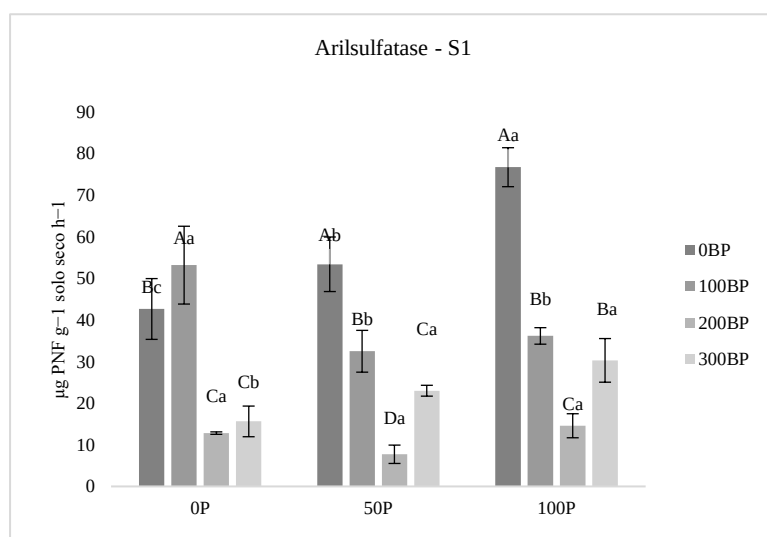


Figura 4.19. Atividade enzimática da arilsulfatase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

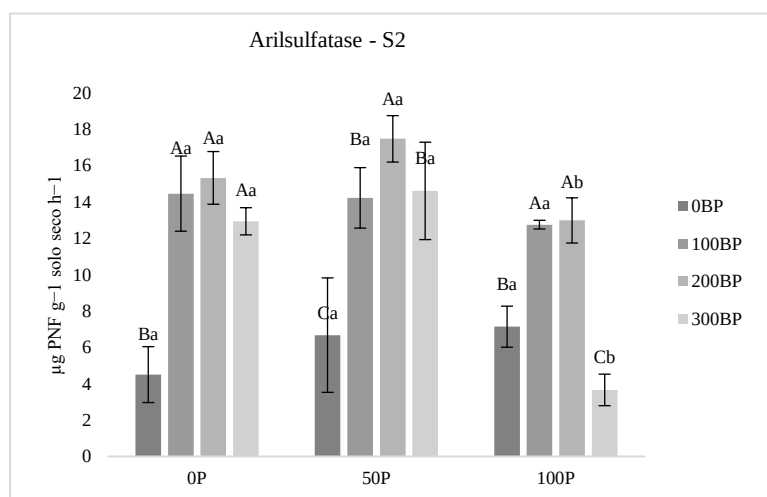


Figura 4.20. Atividade enzimática da arilsulfatase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A atividade da enzima betaglicosidase os fatores apresentaram efeito significativo na interação, e no experimento com S1 (Figura 4.21) o T5 se destacou sendo ligeiramente maior e estatisticamente diferente dos demais, com atividade enzimática de $1747,98 \mu\text{g}$

PNF g^{-1} solo seco h^{-1} . O menor valor, 1309,6 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , foi observado em T11, sendo estatisticamente diferente de todos os tratamentos. Já no S2 (Figura 4.22), o T10 foi aquele o maior valor de atividade enzimática da betaglicosidase, 892,9 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , mas sem diferença estatística de T7, T8, T9, T10, T11 e T12, com valores entre 826,71 a 892,92. O menor valor foi observado em T1, com 703,31 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} e sem diferença estatística com a atividade observada em T4, que apresentou valor de 717,14 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} .

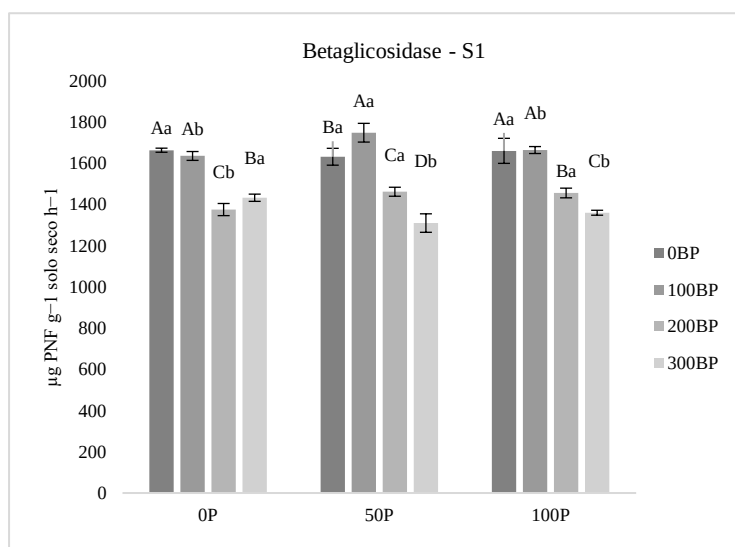


Figura 4.21. Atividade enzimática da betaglicosidase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

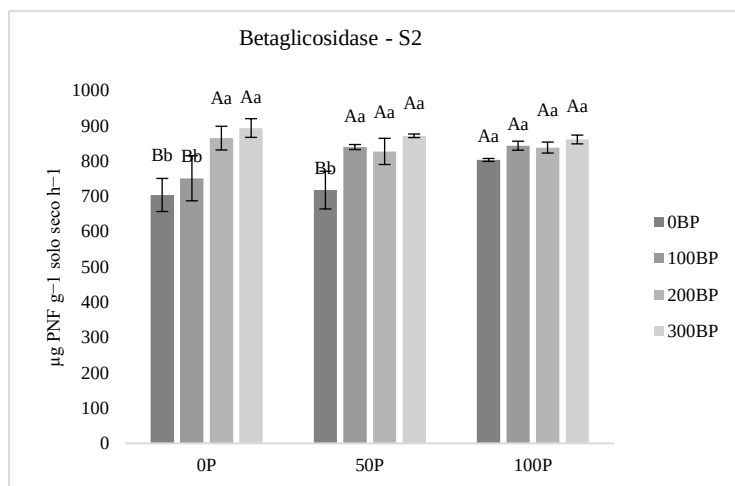


Figura 4.22. Atividade enzimática da betaglicosidase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

No S1, a enzima fosfatase teve a maior atividade no tratamento T2, com o, 247,5 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} (Figura 4.23), sendo estatisticamente igual aos tratamentos T3 e T6, enquanto o menor valor foi em T9, com 153,4 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , não sendo estatisticamente diferente dos tratamentos T10, T11 e T12. No S2, o tratamento T11 se destacou com maior valor da atividade da fosfatase, com 185,6 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1}

(Figura 4.24), porém sem diferença estatísticas com os tratamentos T1, T3, T4, T9, T10 e T12. Já o menor valor observado foi aquele referente ao tratamento T7, com atividade de $142,2 \mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, e estaticamente igual aos tratamentos T2, T5 e T6.

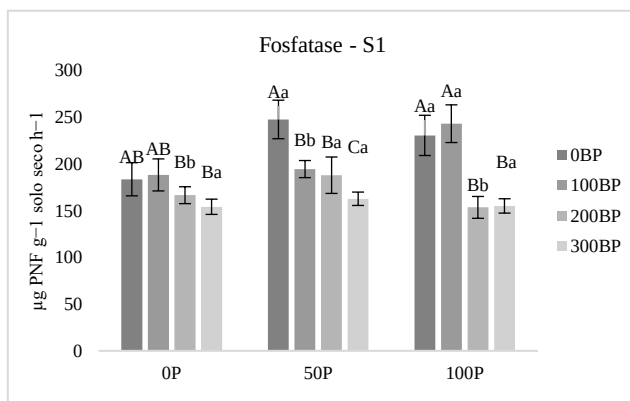


Figura 4.23. Atividade enzimática da fosfatase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

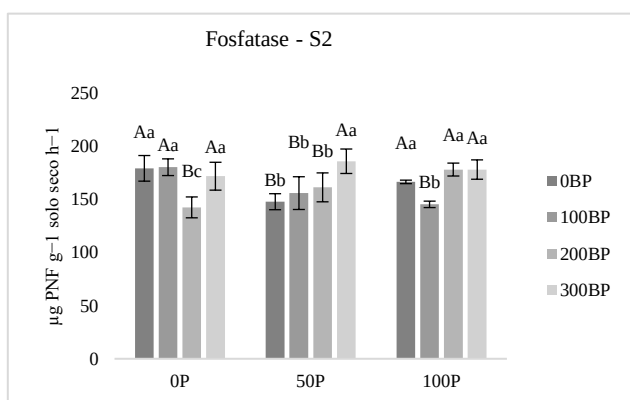


Figura 4.24. Atividade enzimática da fosfatase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Com relação à enzima urease, no S1, a maior atividade foi observada no T10, com $4,4 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.25), mas sem diferença estatística com os demais tratamentos. Enquanto, o tratamento T6 apresentou a menor atividade enzimática, com $2,5 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, sem diferença significativa com os tratamentos T5 e T8. Já no S2, a maior atividade da urease foi observada no T12, com $7,2 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, sendo estaticamente igual ao T9. O tratamento T7 teve o menor valor de atividade, $3,1 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.26), estatisticamente diferente dos demais tratamentos.

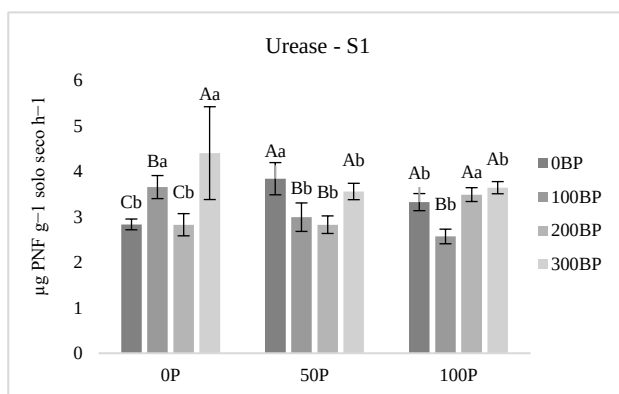


Figura 4.25. Atividade enzimática da urease, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

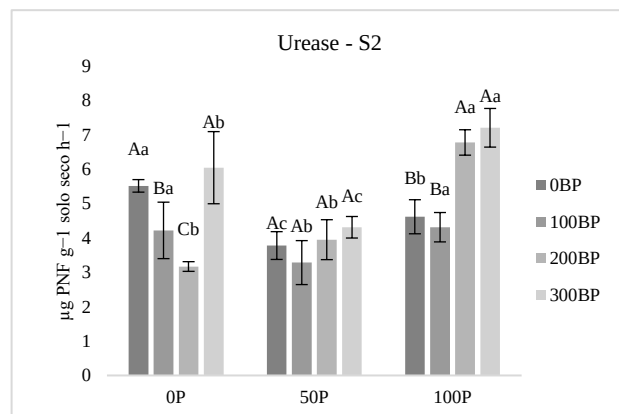


Figura 4.26. Atividade enzimática da urease, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A quantidade de FDA no S1 foi mais expressiva no tratamento T3 com valor de 1843,0 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco, sendo estatisticamente igual apenas com o T5 (Figura 4.27). O tratamento com menor valor da quantidade de FDA e que diferiu dos demais foi o T12, com 1126,0 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco. No S2, o tratamento T10 foi aquele com a maior quantidade, com 616,7 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco (Figura 4.28). Para o mesmo tipo de solo, o menor valor observado foi o de T2, com 219,8 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco, porém estatisticamente igual ao tratamento T4, T5 e T6.

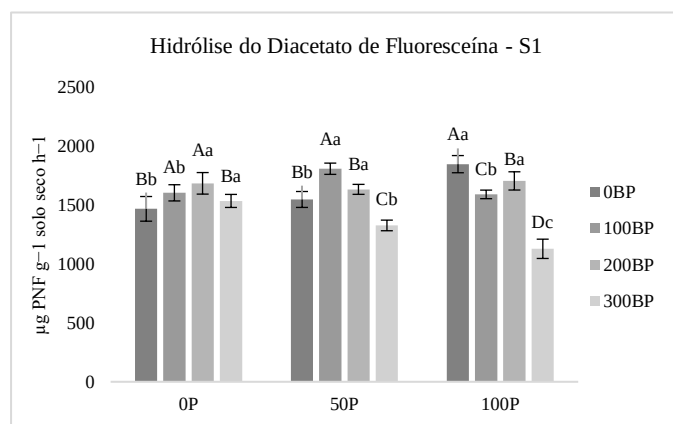


Figura 4.27. Hidrólise do diacetato de fluoresceína, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

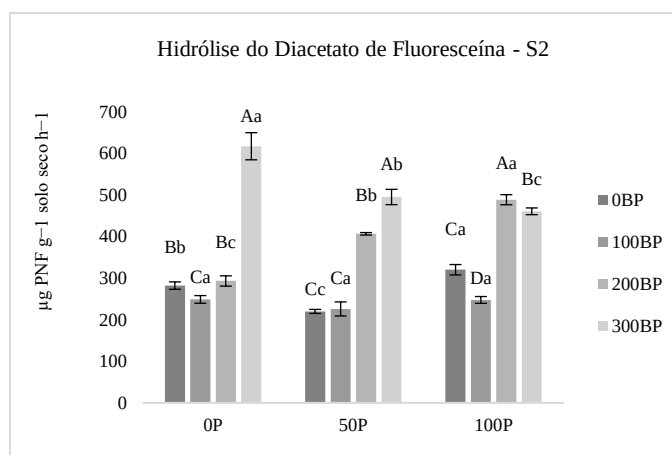


Figura 4.28. Hidrólise do diacetato de fluoresceína, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A enzima desidrogenase apresentou maior valor de atividade no tratamento T5, quando foi analisada no S1, com $33,8 \mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.29), sendo estatisticamente igual aos tratamentos T1, T3, T4 e T7. Ainda no S1, o tratamento T11 teve o menor valor de atividade, com $24,9 \mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, sendo igual estatisticamente aos tratamentos T2, T10 e T12.

No S2, o tratamento T9 obteve o maior valor de atividade para a desidrogenase, com $13,0 \mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, sem diferença estatística significativa com os tratamentos T1, T3 e T12 (Figura 4.30). Já o tratamento T7 foi aquele com a menor atividade, $9,0 \mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, diferindo estatisticamente de todos os demais tratamentos.

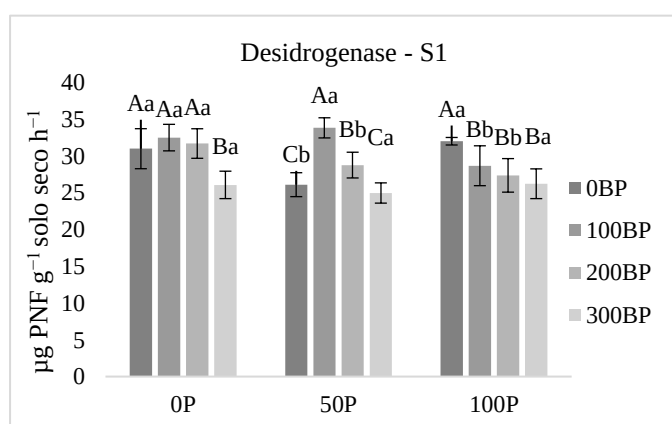


Figura 4.29. Atividade enzimática da desidrogenase, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

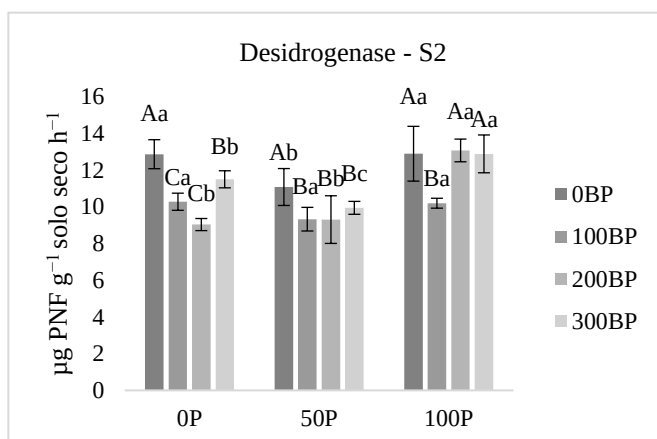


Figura 4.30. Atividade enzimática da desidrogenase, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Quando a RBS foi analisada para o S1, foi observado o maior valor no tratamento T9, com $13,1 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$ (Figura 4.31), e sem diferença estatisticamente significativa com os demais tratamentos. No mesmo tipo de solo, o tratamento T8 foi o que teve o menor valor da análise, com $4,5 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$, sendo ainda estatisticamente igual ao T7. Já no S2, o T7 obteve o maior valor de RBS com $14,9 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$ (Figura 4.32). Enquanto, o valor de RBS referente ao T12 foi o menor observado, com $7,8 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$, sem diferença estatisticamente significativa com os tratamentos T10.

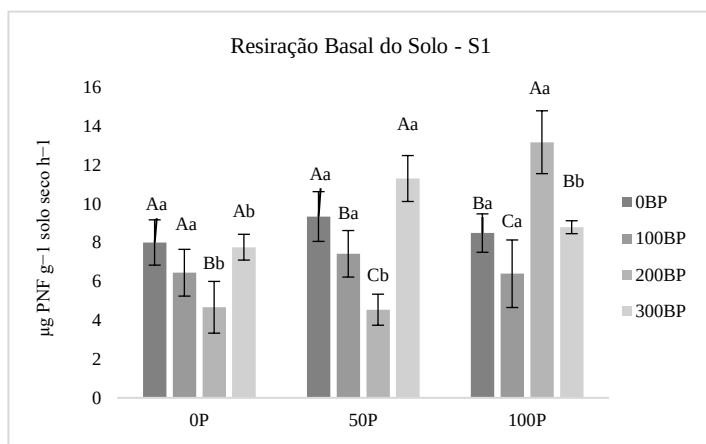


Figura 4.31. Respiração basal do solo, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

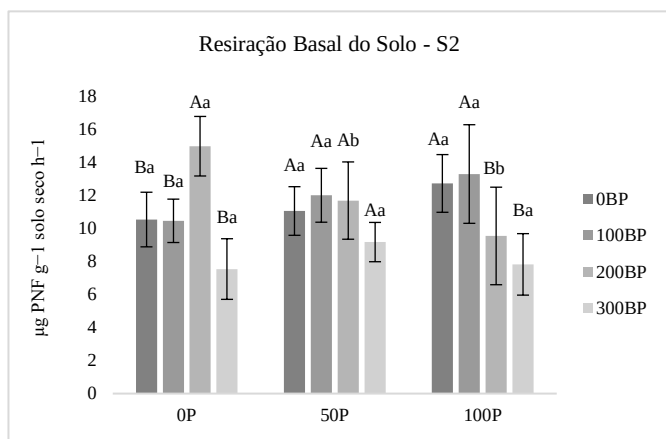


Figura 4.32. Respiração basal do solo, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

No S1, a quantidade de CBM foi ligeiramente maior no T9, com $596,6 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo (Figura 4.33), apesar de outros tratamentos terem apresentados valores de médias próximos, o T9 não foi estatisticamente maior que os demais tratamentos. O T4 foi aquele com o menor valor, $512,4 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, sem diferença estatística com os demais tratamentos. No S2, o tratamento T3 apresentou o maior valor, $563,8 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, sendo igual estatisticamente aos tratamentos T5, T6, T8, T9, T10, T11 e T12, por outro lado o tratamento T1 apresentou o menor valor $523,5 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo.

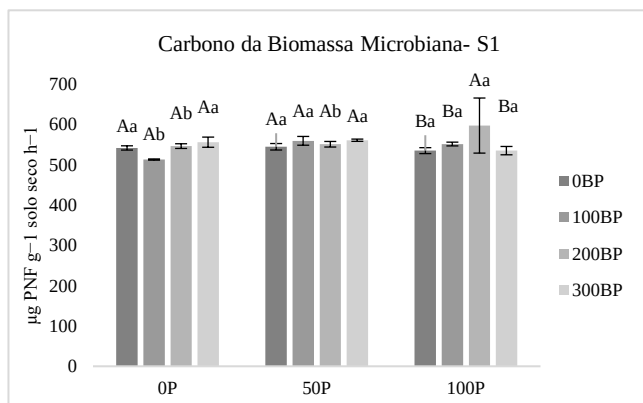


Figura 4.33. Carbono da biomassa microbiana, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

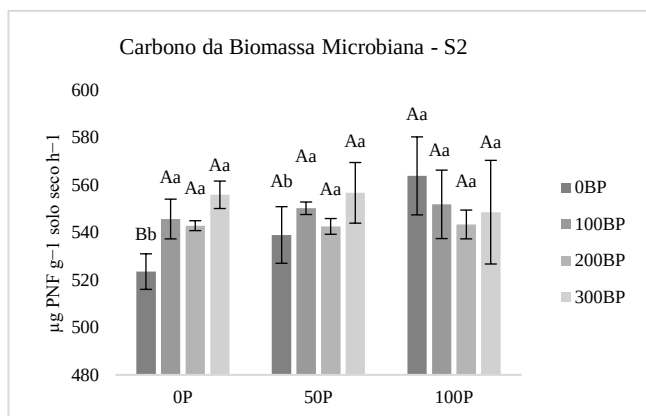


Figura 4.34. Carbono da biomassa microbiana, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Em relação ao NBM no S1, o tratamento T11 foi aquele com quantidade observada, 36,8 $\mu\text{g N g}^{-1}$ solo (Figura 4.35), sem diferença estatisticamente significativa com os tratamentos T1, T4, T5 e T6. Para o mesmo solo o, T9 apresentou a quantidade, com 7,0 $\mu\text{g N g}^{-1}$ solo, e diferente estatisticamente dos demais. No S2, o tratamento T8 foi aquele com a maior quantidade de NBM, com 53,53 $\mu\text{g N g}^{-1}$ solo, sendo estatisticamente igual ao T12. Ao contrário, o tratamento T9 apresentou a menor quantidade, 5,6 $\mu\text{g N g}^{-1}$ solo.

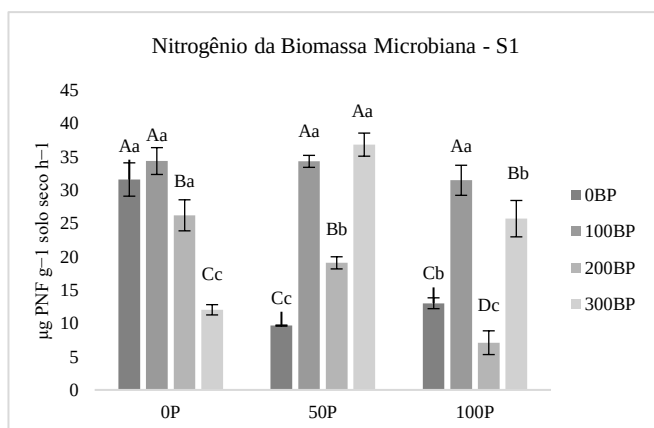


Figura 4.35. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo com alto teor de P (S1), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

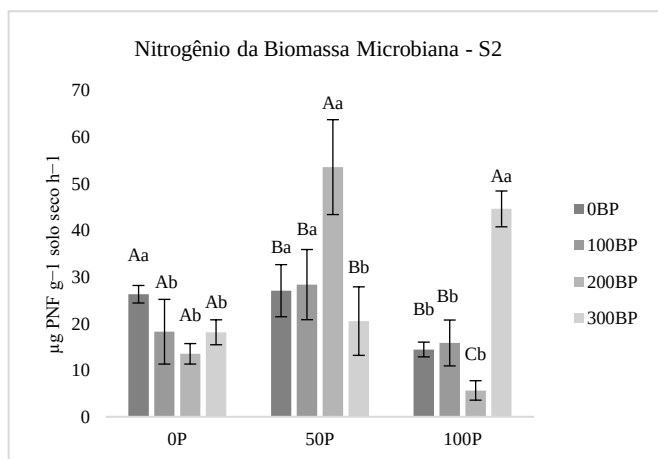


Figura 4.36. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo com baixo teor de P (S2), referente ao segundo experimento de casa de vegetação com feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Experimento de Campo – Primeiro Ciclo

O experimento de campo foi realizado em 2 ciclos de cultivo de feijão comum. No solo coletado nos tratamentos referentes ao primeiro ciclo (C1), a atividade da enzima arilsulfatase, teve efeito positivo com relação a interação entre os fatores. O tratamento com 144,6 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} (Figura 4.37), foi o que apresentou maior atividade da enzima, correspondendo ao T3, porém não apresentou diferença estatística com os valores dos tratamentos T2 e T6. Já o T7 foi o tratamento com menor valor de atividade, 67,1 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} .

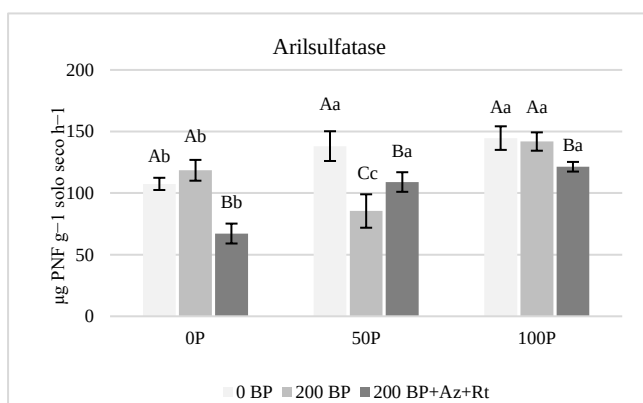


Figura 4.37. Atividade enzimática da arilsulfatase, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Com relação à atividade da enzima betaglicosidase, não houve interação entre os fatores analisados, assim os tratamentos não apresentaram diferença estatística entre si (Figura 4,38).

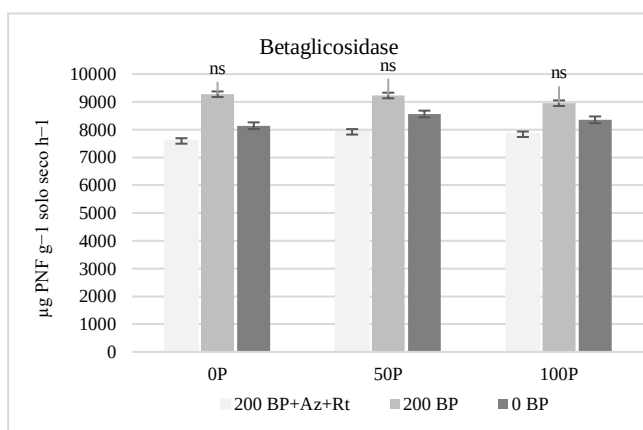


Figura 4.38. Atividade enzimática da betaglicosidase, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão. ns = De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), as médias não apresentaram diferença significativa.

A atividade enzimática da fosfatase foi maior no T1 com 9281,4 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} (Figura 4.39), sem diferença significativa com os tratamentos T3 e T7. Já o tratamento T5 apresentou o menor valor, com 165,6 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} .

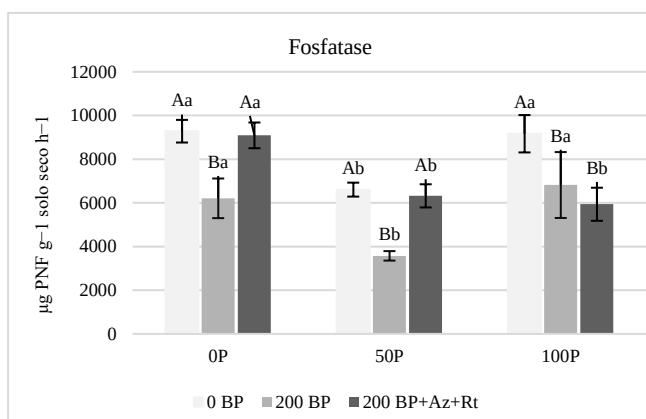


Figura 4.39. Atividade enzimática da fosfatase, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A enzima urease teve no tratamento T7 o maior valor de atividade, $4,4 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$. Esse tratamento apresentou diferença estatística significativa apenas com os tratamentos T8 e T9, sendo esse último, o tratamento com a menor atividade observada, com $2,2 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, sem diferença significativa com o T8.

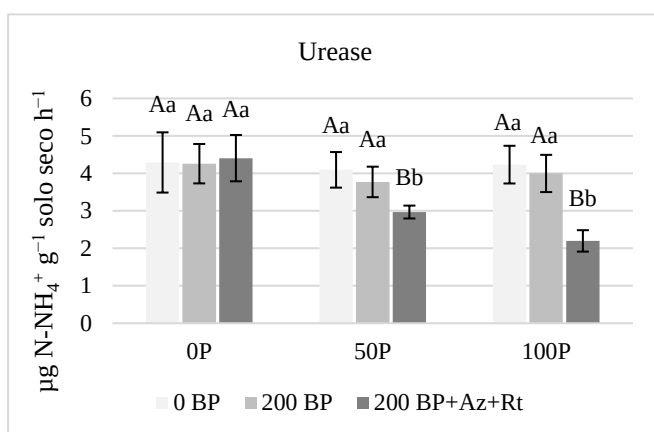


Figura 4.40. Atividade enzimática da urease, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Com relação à atividade da enzima fosfatase, não houve interação entre os fatores analisados, assim os tratamentos não apresentaram diferença estatística entre si (Figura 4.41).

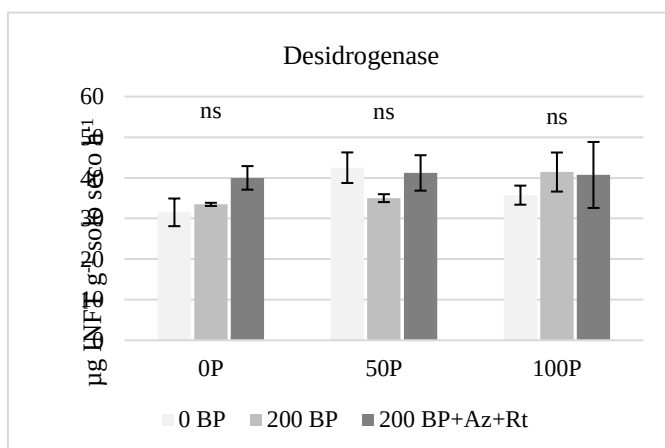


Figura 4.41. Atividade enzimática da desidrogenase, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão. ns = De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), as médias não apresentaram diferença significativa.

A quantificação de FDA apresentou o maior valor no tratamento T3, com 951,4 μg FDA g^{-1} solo seco (Figura 4.42), sem diferença estatisticamente significativa com os tratamentos T1. Já o Por outro lado, o tratamento T6 foi a menor quantidade observada, com 695,8 μg FDA g^{-1} solo seco, sendo estatisticamente igual aos tratamentos T7 e T9.

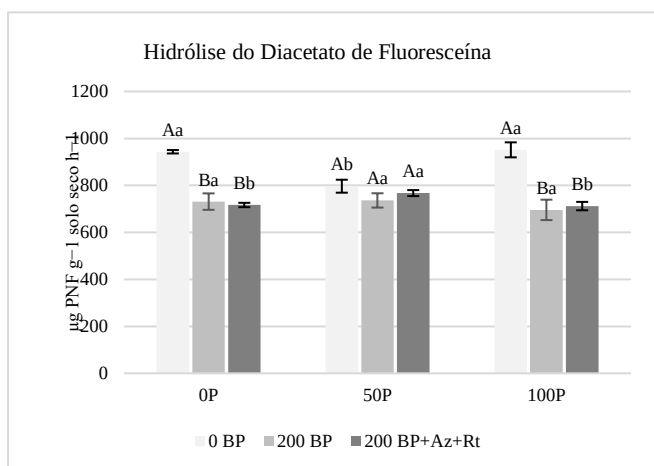


Figura 4.42. Hidrólise do diacetato de fluoresceína, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Na análise da RBS o T3 foi aquele com maior valor, 16,2 μg C-CO₂ g^{-1} solo dia⁻¹, sem diferença estatística com os tratamentos T6 e T9 (Figura 4.43). Já o tratamento T4 foi aquele com o menor valor da RBS, com 8,3 μg C-CO₂ g^{-1} solo dia⁻¹.

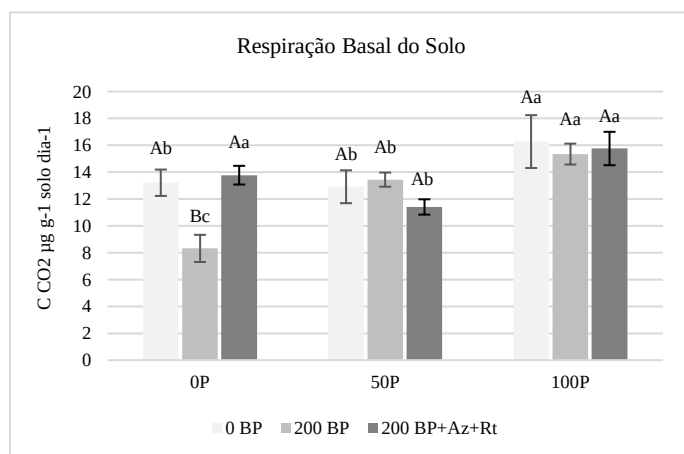


Figura 4.43. Respiração basal do solo, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Na determinação do CBM o tratamento T5 foi aquele com maior valor observado, 593,2 μg C g^{-1} solo (figura 4.44), sendo estatisticamente igual aos tratamentos T1, T3, T7 e T8. Por outro lado, o tratamento T9 apresentou o menor valor, 543,5 μg C g^{-1} solo, diferente dos demais tratamentos.

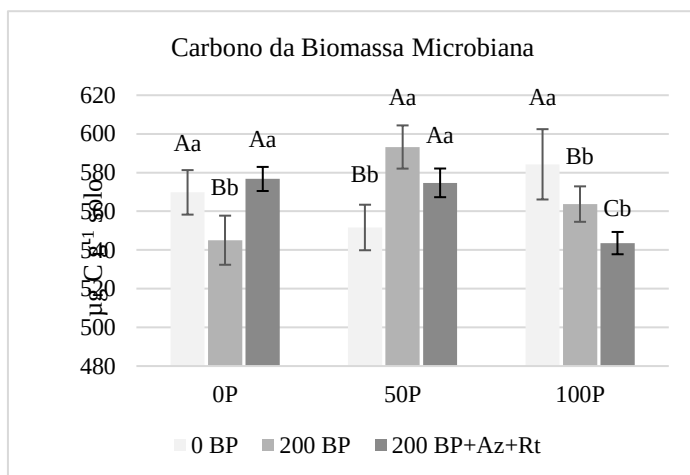


Figura 4.44. Carbono da biomassa microbiana, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Em NBM, o tratamento T4 teve o maior valor, $14,9 \mu\text{g N g}^{-1}$ solo (Figura 4.45), sem diferença significativa com tratamento T2. O tratamento T3 foi aquele com menor valor, $3,9 \mu\text{g N g}^{-1}$ solo, e sem diferença estatística do tratamento T8.

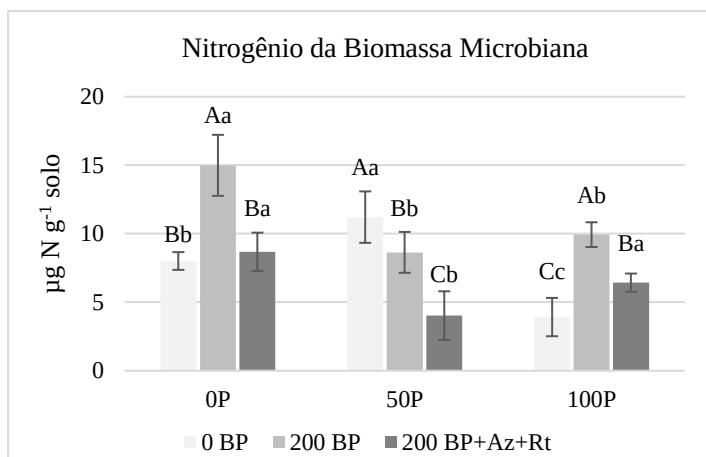


Figura 4.45. Nitrogênio da biomassa microbiana, em experimento de campo referente ao primeiro ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Experimento de Campo – Segundo Ciclo

No segundo ciclo do feijão comum (C2), a atividade da enzima arilsulfatase do solo coletado nos tratamentos apresentou efeito positivo com relação a interação entre os fatores. Assim, o T1 foi o tratamento com a maior atividade, 55,3 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} (Figura 4.46). Já o valor referente ao T8 foi o mais baixo, com 26,5 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} . Os tratamentos que receberam a maior dose de P100 não apresentaram diferença em relação à presença ou ausência do Biomaphos®.

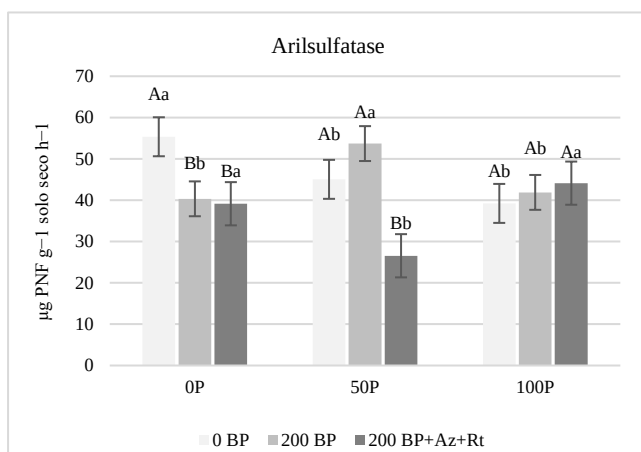


Figura 4.46. Atividade enzimática da arilsulfatase, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A atividade da enzima betaglicosidase teve sua atividade mais expressiva no T7 sendo o com valor de 1177,0 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} (Figura 4.47), mas sem diferença significativa com os tratamentos T3 e T6. Já o tratamento T1 foi o que apresentou menor valor de atividade com 964,0 $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , diferente estatisticamente dos demais tratamentos.

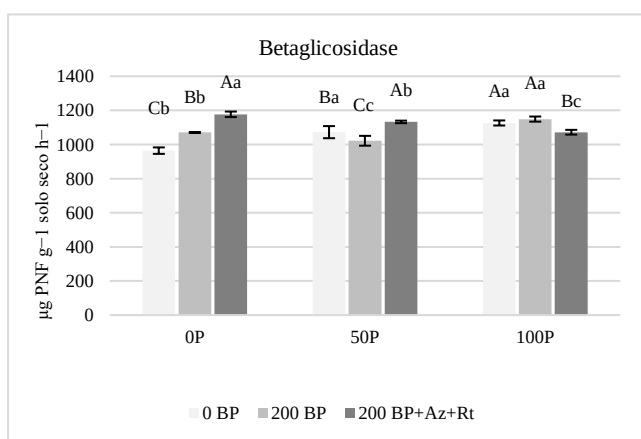


Figura 4.47. Atividade enzimática da betaglicosidase, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Com relação à atividade da enzima fosfatase, não houve interação entre os fatores analisados, assim os tratamentos não apresentaram diferença estatística entre si (Figura 4.48).

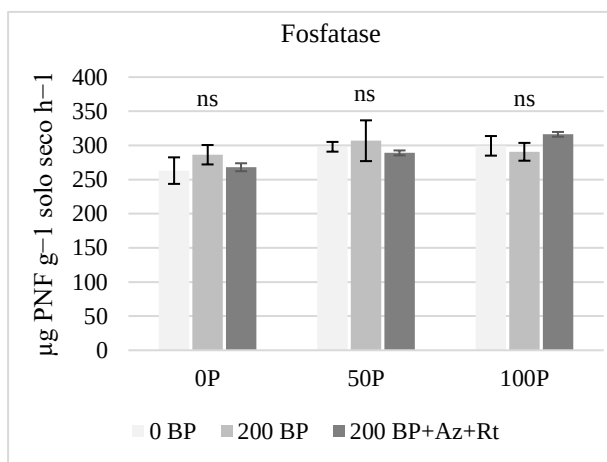


Figura 4.48. Atividade enzimática da fosfatase, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão. ns = De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), as médias não apresentaram diferença significativa.

A atividade enzimática da desidrogenase teve o maior valor em T3, com $60,5 \mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.49), mas sem diferença estatística significativa com T1, T4 e T5. Segundo os dados o T9 foi o que apresentou o menor valor de atividade, com $43,0 \mu\text{g NFT g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$.

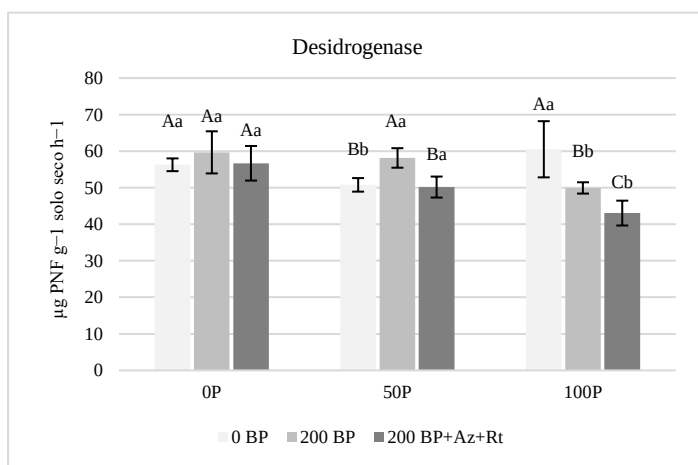


Figura 4.49. Atividade enzimática da desidrogenase, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Na quantificação de FDA o tratamento maior valor obtido foi o T2, com $1763,9 \mu\text{g FDA g}^{-1} \text{ solo seco}$ (Figura 4.50), sendo estatisticamente igual aos tratamentos T6 e T9. Já o tratamento T8 foi aquele com a menor quantidade média de FDA, com $1348,6 \mu\text{g FDA g}^{-1} \text{ solo seco}$.

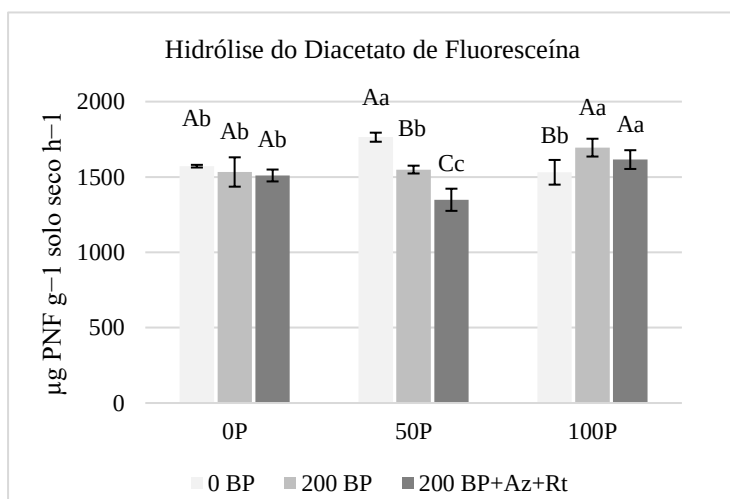


Figura 4.50. Hidrólise do diacetato de fluoresceína, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Para urease, os tratamentos T6 e T4 foram aquele com os maiores valores de atividade, sendo estatisticamente iguais e ambos com valores de $5,1 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ (Figura 4.51). Ao contrário, o tratamento T7 obteve o menor valor de atividade, $3,5 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, e sem diferença significativa com os tratamentos T2 e T3.

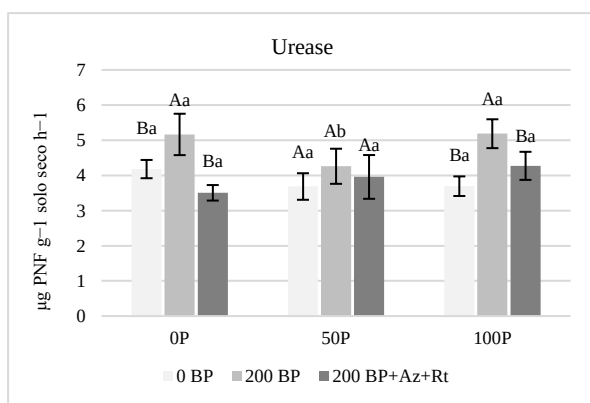


Figura 4.51. Atividade enzimática da urease, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Na análise de RBS, o tratamento T3 foi aquele com o maior valor, $30,0 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$. Nessa mesma análise o T8 foi o que apresentou menor valor de RBS, com $20,3 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$, sendo estatisticamente diferente dos demais.

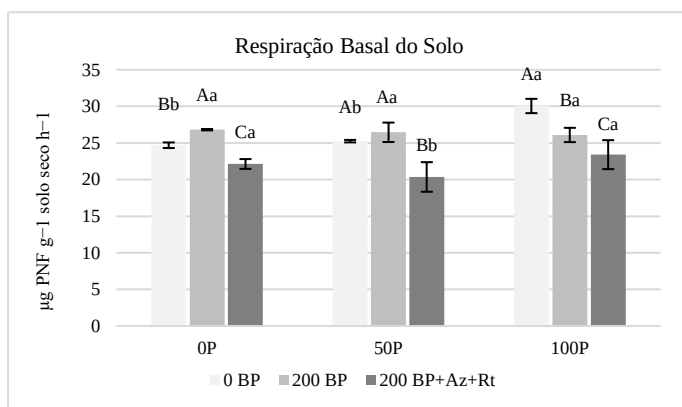


Figura 4.52. Respiração basal do solo, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

O CBM foi observado em maior quantidade no tratamento T1, com $115,0 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, no entanto não foi observada diferença estatística significativa com os tratamentos T7, T5, T3 E T9. Por outro lado, o tratamento T4 foi aquele com o valor mais baixo de CBM, com $44,9 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo (Figura 4.53), sendo estatisticamente igual aos tratamentos T6 e T8.

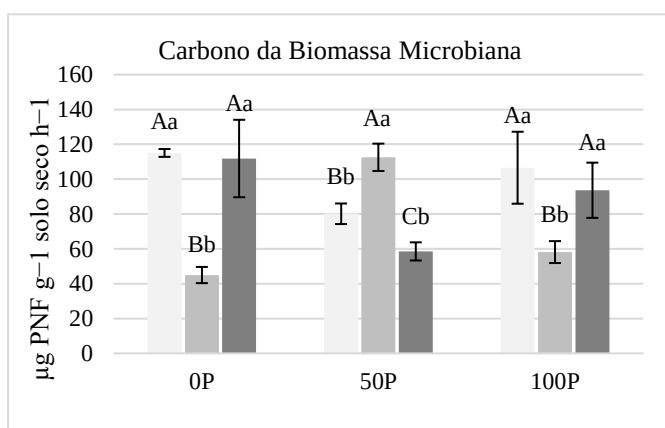


Figura 4.53. Carbono da biomassa microbiana, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

A quantidade de NBM foi maior no tratamento T7, com $69,3 \mu\text{g N g}^{-1}$ solo, sem diferença estatística significativa com o tratamento T9 (Figura 4.54). Já o menor valor observado foi aquele observado no T1, com $15,6 \mu\text{g N g}^{-1}$ solo e estatisticamente igual ao T6.

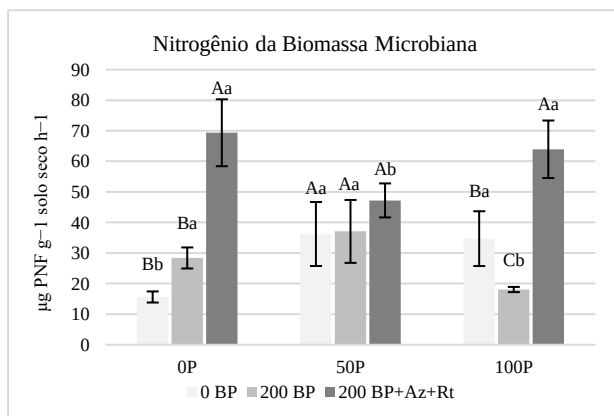


Figura 4.54. Nitrogênio da biomassa microbiana, em experimento de campo referente ao segundo ciclo de cultivo de feijão-comum. De acordo com o teste Scott&Knott ($p \leq 0,05$), médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si no fator Biomaphos® (A) dentro do fator P (B); médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si no fator P (B) dentro do fator Biomaphos® (A). As barras representam a média $\pm$ erro padrão.

Considerações

Os resultados obtidos evidenciam que a atividade microbiológica do solo foi fortemente influenciada pela interação entre o uso do Biomaphos® e as doses de P aplicadas, com respostas distintas em função do ambiente experimental e da condição inicial de fertilidade do solo. De maneira geral, a presença de interação significativa em grande parte das variáveis indica que o efeito do inoculante não é isolado, mas dependente da disponibilidade de P, reforçando a complexidade das relações entre microrganismos e nutrientes no solo.

Nos experimentos conduzidos em casa de vegetação, tanto no primeiro quanto no segundo ensaio, observou-se maior sensibilidade das variáveis microbiológicas às condições impostas. Enzimas como arilsulfatase, betaglicosidase e desidrogenase apresentaram variações expressivas entre os tratamentos, indicando alterações na atividade metabólica microbiana. Em diversos casos, especialmente no S2, foram observados maiores valores de atividade enzimática. Esse comportamento sugere que a limitação de P pode estimular a microbiota do solo a intensificar a produção de enzimas relacionadas à ciclagem de nutrientes, como estratégia para aumentar a disponibilidade desse elemento.

Além disso, em algumas situações, tratamentos sem a aplicação de Biomaphos® apresentaram valores elevados de atividade enzimática, indicando que a resposta microbiana não depende exclusivamente da inoculação, mas também das condições intrínsecas do solo e da disponibilidade de substrato. Por outro lado, em determinados tratamentos, a associação entre Biomaphos® e doses intermediárias de P promoveu aumentos na atividade enzimática, sugerindo um possível efeito sinérgico em condições específicas.

Nos experimentos de campo, realizados em dois ciclos de cultivo, as respostas foram menos pronunciadas e oscilaram mais entre as variáveis analisadas. Em alguns casos, como na atividade de arilsulfatase e na hidrólise de FDA, foram observadas diferenças entre tratamentos, porém, para outras variáveis, como betaglicosidase e desidrogenase em determinados momentos, não houve efeito significativo. Essa menor consistência pode ser atribuída à maior variabilidade ambiental em condições de campo, incluindo fatores como umidade, temperatura e heterogeneidade do solo, que influenciam diretamente a atividade microbiana.

Outro ponto relevante é que, no segundo ciclo de cultivo, algumas variáveis apresentaram mudanças no padrão de resposta em relação ao primeiro ciclo, indicando

possível efeito residual dos tratamentos ou adaptação da microbiota ao longo do tempo. Esse comportamento reforça que os efeitos de práticas de manejo biológico podem ser cumulativos e dependentes da dinâmica do sistema solo-planta ao longo dos ciclos agrícolas.

De forma integrada, variáveis como RBS, CBM e NBM corroboram os resultados enzimáticos, evidenciando alterações na atividade e no tamanho da comunidade microbiana. Em geral, os maiores valores dessas variáveis estiveram associados a tratamentos que favoreceram a atividade biológica, embora nem sempre tenham coincidido com as maiores doses de P, indicando que o excesso desse nutriente pode não necessariamente estimular a atividade microbiana.

Assim, os resultados demonstram que o Biomaphos® possui potencial para influenciar a atividade microbiológica do solo, porém sua eficiência depende diretamente das condições de disponibilidade de P e do ambiente de cultivo. Em condições controladas, como na casa de vegetação, os efeitos são mais evidentes, enquanto em campo tendem a ser mais variáveis. Esses achados reforçam a importância de considerar a interação entre fatores biológicos e químicos no manejo da fertilidade do solo, visando maior eficiência no uso de insumos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

4.5. Validação do uso do Biomaphos®

Município de Angatuba

A aplicação de BiomaPhos® não resultou em diferenças estatisticamente significativas para as variáveis avaliadas ($p > 0,05$); entretanto, foram observadas diferenças numéricas entre os tratamentos. A massa fresca de cascas apresentou média de $8,52 \text{ g planta}^{-1}$ no tratamento com BiomaPhos® e de $7,09 \text{ g planta}^{-1}$ no tratamento sem aplicação, correspondendo a um incremento de 20,3%. Para a massa fresca da parte aérea, as médias foram de $11,76$ e $9,59 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente, representando aumento de 22,7%. A massa seca de cascas foi de $7,16 \text{ g planta}^{-1}$ com BiomaPhos® e $6,12 \text{ g planta}^{-1}$ sem BiomaPhos® (+17,0%), enquanto a massa seca da parte aérea apresentou médias de $8,33$ e $6,77 \text{ g planta}^{-1}$, resultando em incremento de 23,0%.

O número de vagens por planta foi numericamente superior no tratamento com BiomaPhos® (23 vagens) em comparação ao controle (20 vagens), correspondendo a um aumento de 15,6%, enquanto o número de grãos por vagem foi idêntico entre os tratamentos ($5 \text{ grãos vagem}^{-1}$), indicando ausência de efeito sobre o enchimento das vagens. O número total de grãos por planta apresentou média de 119 grãos com BiomaPhos® e de 102 grãos sem BiomaPhos®, o que representa incremento de 16,4%.

Durante o florescimento, a massa fresca de caule foi semelhante entre os tratamentos ($29,23$ e $28,80 \text{ g planta}^{-1}$), enquanto a massa fresca de folhas apresentou médias de $72,01$ e $73,05 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente. A massa seca de caule ($4,52$ vs. $4,41 \text{ g planta}^{-1}$) e de folhas ($9,56$ vs. $9,18 \text{ g planta}^{-1}$) apresentou diferenças inferiores a 5%. Com relação à produtividade de grãos, não houve diferença estatística entre os tratamentos, com produtividade de $5.394,6 \text{ kg ha}^{-1}$ no tratamento com BiomaPhos® e $5.493,7 \text{ kg ha}^{-1}$ no tratamento sem aplicação.

Município de Pratânia

Em Pratânia, a aplicação de BiomaPhos® promoveu incrementos expressivos e estatisticamente significativos em variáveis associadas ao crescimento vegetativo e aos componentes de rendimento. A massa fresca de cascas aumentou de $7,32$ para $12,54 \text{ g planta}^{-1}$ (+71,4%, $p < 0,05$), e a massa fresca da parte aérea foi elevada de $29,82$ para $44,92 \text{ g planta}^{-1}$ (+50,6%, $p < 0,05$) com o uso do BiomaPhos®. Resultados semelhantes foram observados para a massa seca de cascas (+56,1%, $p < 0,05$) e da parte aérea (+55,5%, $p < 0,05$). O número de vagens por planta aumentou de 17 para 26 (+55,8%, $p < 0,05$),

refletindo em maior número total de grãos por planta (106 vs. 76 grãos, +39,5%, $p < 0,05$). Em contraste, o número de grãos por vagem não foi influenciado pelo tratamento, indicando que o efeito do BiomaPhos® esteve associado principalmente ao aumento no número de estruturas reprodutivas, e não ao enchimento das vagens. Apesar dos ganhos consistentes em biomassa e componentes de rendimento, a produtividade final não diferiu estatisticamente entre os tratamentos (4.776,2 kg ha⁻¹ no tratamento com BiomaPhos® e 4.977,3 kg ha⁻¹ no tratamento sem aplicação), sugerindo que os efeitos positivos observados em nível de planta não se traduziram em incremento significativo de rendimento.

Município de Paranapanema (Holambra II)

Em Holambra II, a aplicação de BiomaPhos® promoveu respostas fisiológicas e produtivas distintas ao longo do ciclo da cultura. Embora não tenham sido observadas diferenças estatisticamente significativas para a biomassa final da planta e para os componentes de rendimento, o BiomaPhos® aumentou de forma expressiva a biomassa vegetativa no florescimento, com incrementos de 38,0% na massa fresca de caule, 35,5% na massa fresca de folhas, 44,2% na massa seca de caule e 41,7% na massa seca de folhas ($p \leq 0,01$). Esses efeitos refletiram-se em incremento significativo de produtividade, que passou de 5.611,8 para 6.227,7 kg ha⁻¹, representando aumento de 11,0% em relação ao tratamento controle ($p = 0,0006$). Os resultados indicam que, sob as condições ambientais de Holambra, o estímulo ao crescimento vegetativo proporcionado pelo BiomaPhos® foi eficientemente convertido em rendimento.

Município de Pardinho, SP

No município de Pardinho, não houve diferença para a massa seca da parte aérea, número de vagens, grãos por vagem e grãos por planta com o uso do BiomaPhos®. No entanto, a produtividade de grãos apresentou efeito significativo do produto ($p = 0,0039$), com incremento médio de aproximadamente 25% na produção quando o BiomaPhos® foi utilizado (4.346 kg ha⁻¹) em comparação ao manejo sem o produto (3.483 kg ha⁻¹).

Embora variáveis estruturais do rendimento, como massa seca da parte aérea, número de vagens e número de grãos, não tenham apresentado diferenças estatísticas isoladas, o aumento expressivo da produtividade indica que o BiomaPhos® tem potencial para aumentar a eficiência agrônômica do feijoeiro em condições de campo, consolidando

seu papel como ferramenta biológica estratégica para intensificação sustentável da produção.

Considerações

De forma integrada, os resultados obtidos evidenciam que a resposta à aplicação do BiomaPhos® variou entre os ambientes avaliados (Figura 5.1), demonstrando forte influência das condições edafoclimáticas e do sistema produtivo sobre a eficiência da tecnologia. Em Angatuba (Figura 5.1A) e Pratânia (Figura 5.1B), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na produtividade entre os tratamentos, embora, em Angatuba, tenham sido verificadas tendências numéricas favoráveis ao uso do produto em variáveis estruturais e componentes de rendimento. Em Pratânia, apesar da ausência de incremento na produtividade final, a aplicação de BiomaPhos® promoveu aumentos expressivos em características relacionadas ao crescimento vegetativo e aos componentes de produção, com incrementos superiores a 50% na biomassa da parte aérea, no número de vagens e no número total de grãos por planta.

Em contraste, nos ambientes de Holambra II (Figura 5.1C) e Pardinho (Figura 5.1D), a aplicação de BiomaPhos® resultou em incremento significativo da produtividade. Em Holambra II, o efeito positivo foi observado tanto no crescimento vegetativo durante o florescimento quanto no rendimento final, com aumentos significativos na massa fresca e seca de caule e folhas, acompanhados por elevação de aproximadamente 11% na produtividade. Esse comportamento indica eficiente conversão do crescimento vegetativo em produção de grãos, sugerindo que as condições ambientais favoreceram a manutenção da atividade fisiológica das plantas e o adequado suprimento de recursos durante o enchimento de grãos.

De maneira semelhante, em Pardinho, verificou-se aumento significativo da produtividade com o uso do BiomaPhos®, conforme evidenciado pela diferença estatística entre os tratamentos. Os resultados demonstram que a utilização de microrganismos solubilizadores de fosfato contribuiu efetivamente para o aumento do rendimento da cultura, evidenciando o potencial da tecnologia na melhoria da eficiência nutricional das plantas.

De forma geral, os resultados indicam que a aplicação de BiomaPhos® pode induzir respostas fisiológicas positivas, especialmente relacionadas ao crescimento vegetativo e à formação de estruturas reprodutivas; entretanto, a expressão desses efeitos em produtividade final é altamente dependente do ambiente. Em sistemas mais responsivos,

como observado em Holambra II e Pardinho, o estímulo vegetativo foi convertido em ganhos produtivos, enquanto em Angatuba e Pratânia, os efeitos permaneceram restritos a componentes intermediários da produção.

Esses achados reforçam a importância da realização de avaliações multiambientais para a validação agrônômica de bioinsumos e indicam que o uso do BiomaPhos® deve ser considerado como uma estratégia sustentável e complementar ao manejo nutricional. Seu potencial para elevar a produtividade agrícola, reduzir a dependência de fertilizantes minerais e promover sistemas de produção mais eficientes e ambientalmente responsáveis está diretamente condicionado à interação entre manejo, ambiente e fisiologia da cultura.

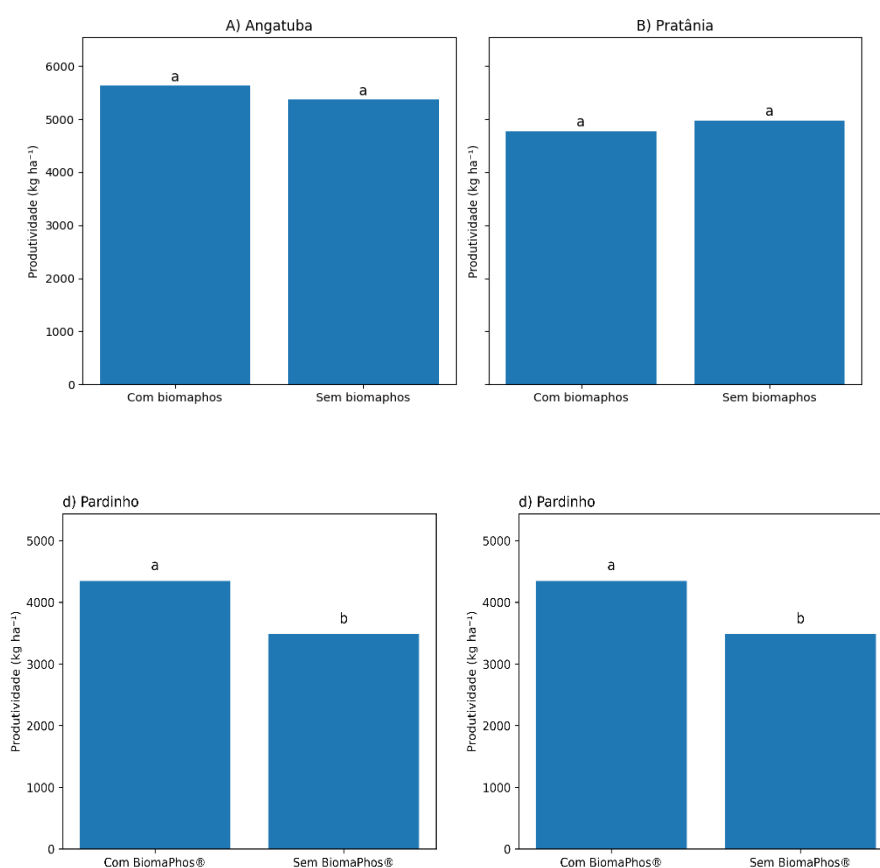


Figura 5.1. Produtividade média (kg ha⁻¹) em função da aplicação de BiomaPhos® nos municípios de Angatuba (A), Pratânia (B), Holambra II (C) e Pardinho (D). Barras representam a média. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si.

5. REFERÊNCIAS

- ABREU, C. S. DE, FIGUEIREDO, J. E. F., OLIVEIRA, C. A., SANTOS, V. L. DOS, GOMES, E. A.; RIBEIRO, V. P.; BARROS, B. DE A.; LANA, U. G. DE P.; MARRIEL, I. E. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017
- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 420p.1995.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, 2007.
- BABALOLA, O. O., & GLICK, B. R. The use of microbial inoculants in African agriculture: current practice and future prospects. **Journal Food Agriculture Environment**, v. 10, n. 3, p. 540-549, 2012.
- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.32, p.671-674, 1981.
- CASSETARI, L. S.; GOMES, M. S.; SANTOS, D. C.; SANTIAGO, W. D.; ANDRADE, J.; GUIMARÃES, A. C.; SOUZA, J. A.; CARDOSO, M. G.; MALUF, W. R.; GOMES, L. A. β -carotene and chlorophyll levels in cultivars and breeding lines of lettuce. **Acta Horticulturae**. v.1083, p.469-474, 2015.
- CLARKSON, D.T., HANSON, J.B., The mineral nutrition of higher plants. **Annual Review Plant Physiology**. v.31, p.239–298,1980.
- CNA. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Balanço 2020 e perspectivas 2021**. Brasília: CNA, 2022. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/paginas-especiais/balanco-2020-e-perspectivas-2021>. Acesso em: 12 jun. 2022.
- CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by P31 nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, v.36, p.199-207, 1985.
- DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v.6, p.82-85, 1977.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.20, n.5, p.601-606, 1988.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Faostat**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/21/visualize>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 991-996, 1999.

GATIBONI, L. C.; CONDRON, L. M. A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agroecosystems. **Geoderma**, v. 385, p. 114893, 2021.

GUAN, J. L.; MACHAMER, C. E.; ROSE, J. K. Glycosylation allows cell-surface transport of an anchored secretory protein. **Cell**, v.42, n.2, p.489-496,1985.

HAYAT, I., AHMAD, A., MASUD, T., AHMED, A., & BASHIR, A. Nutritional and health perspectives of beans (*Phaseolus vulgaris* L.): an overview. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 54, n. 5, p. 580-592, 2014.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.970-976, 1982.

ISTINA, I. N., WIDIASTUTI, H., JOY, B., & ANTRALINA, M. Phosphate-solubilizing microbe from Sapristis peat soil and their potency to enhance oil palm growth and P uptake. **Procedia Food Science**, v. 3, p. 426-435, 2015.

JOHAN, P. D., AHMED, O. H., OMAR, L., & HASBULLAH, N. A. Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash. **Agronomy**, v. 11, n. 10, p. 2010, 2021.

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

KELLER, B., ARIZA-SUAREZ, D., DE LA HOZ, J., APARICIO, J. S., PORTILLA-BENAVIDES, A. E., BUENDIA, H. F., ... & RAATZ, B. Genomic prediction of agronomic traits in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under environmental stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1001, 2020.

MERSI, W.; SCHINNER, F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodonitrotetrazolium chloride. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.11, n.3, p.216-220, 1991.

MESSINA, V. Nutritional and health benefits of dried beans. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 100, n. 1, p. 437S-442S, 2014.

MURPHY, J.; RILLEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27, p.31-36, 1962.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A., COTA, L. V., MARRIEL, I. E., GOMES, E. A., SOUSA, S. M. DE, LANA, U. G. DE P., SANTOS, F. C. DOS, PINTO JÚNIOR, A. S., ALVES, V. M. C. Viabilidade técnica e econômica do Biomaphos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas culturas de milho e soja. **Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**, 2020. 21 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 210).

PAIVA, C. A. de O.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; ALVES, V. M. C.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; SANTOS, F. C. dos; SOUZA, F. F. de; LANDAU, E. C.; PINTO JUNIOR, A. S.; LANA, U. G. de P. Validação da recomendação para o uso do inoculante

BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura de soja. **Circular Técnica**/Embrapa Milho e Sorgo, 18p. 2021.

PAIVA, C. A. de. O.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de.; PAULA, U. G. de; SANTOS, F. C. dos; PINTO JUNIOR, A. S.; ALVES, V. M. C. Viabilidade técnica e econômica do BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura do milho. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** / Embrapa Milho e Sorgo, 20 p. 2020.

PRABHU, N.; BORKAR, S.; GARG, S. Phosphate solubilization by microorganisms. **Advances in Biological Science Research**. Elsevier, p.161–176, 2019.

RAJ, D. P. R. S.; LINDA, R.; BABYSON, R. S. Molecular characterization of phosphate solubilizing bacteria (PSB) and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) from pristine soils. **International Journal Innovative Science, Engineering & Technology**, v. 1, p. 317-324, 2014.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **IAC**, 285p. 2001.

RAIJ, van B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo Campinas. **IAC, Boletim Técnico** n.100, 1996.

REINPRECHT, Y., SCHRAM, L., MARSOLAIS, F., SMITH, T. H., HILL, B., & PAULS, K. P. Effects of nitrogen application on nitrogen fixation in common bean production. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1172, 2020.

RHODES, L. H., GERDEMANN, J. W. Phosphate uptake zones of mycorrhizal and non mycorrhizal onions. **New Phytologist**, v.75, p.555–561,1975.

SANTOS, M. M., BRITO, V. F., DA SILVA, E. M., DOS SANTOS, M. G., BARROS, H. B., & LOPES, M. B. S. Produtividade de feijoeiro-caupi cultivado com estirpes rizobianas e doses de fósforo. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.18, n.3 p. 209-217, 2019.

SOUSA, S. M. DE, OLIVEIRA-PAIVA, C. A., ANDRADE, D. L., CARVALHO, C. G. DE, RIBEIRO, V. P., PASTINA, M. M., MARRIEL, I. E., LANA, U. G. DE P.; GOMES, E. A. Tropical *Bacillus strains* inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 867-877, 2021.

STOTZKY, G. Microbial respiration. Methods of Soil Analysis. Part 2. **Chemical and Microbiological Properties**, Soil Science Society of America, Madison, p.1550 –1572, 1965.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.34, n.2, p.225-229, 1970.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 2017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati, 1971.

UEBERSAX, M. A., CICHY, K. A., GOMEZ, F. E., PORCH, T. G., HEITHOLT, J., OSORNO, J. M., ... & BALES, S. Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security—A review. **Legume Science**, v. 5, n. 1, p. e155, 2023.

VELLOSO, C. C. V., OLIVEIRA-PAIVA, C. A., GOMES, E. A., LANA, U. G. DE P., CARVALHO, C. G., GUIMARÃES, L. J. M., PASTINA, M. M., SOUSA, S. M. DE. Genome-guided insights of tropical *Bacillus strains* efficient in maize growth promotion. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 96, n. 9, p.157, 2020.

ZHANG, T., HU, F., MA, L. Phosphate-solubilizing bacteria from safflower rhizosphere and their effect on seedling growth. **Open Life Sciences**, v. 14, n. 1, p. 246-254, 2019.

ZUCARELI, C., SILVA, R. R., GAZOLA, D., CHAVES, D. P., & NAKAGAWA, J. Phosphorus fertilization and planting dates on the chemical seeds composition of two dry bean. **Ciência Rural**, v.44, n. 9, p.1549-1556, 2014.

6. ATIVIDADE EXTRAS

6.1 Levantamento e caracterização dos principais sistemas de produção de feijão-comum e tipos de solo junto às unidades produtivas no estado de São Paulo

Nesta atividade foi proposta a realização de um levantamento e caracterização dos principais sistemas de produção do feijoeiro-comum e dos tipos de solo presentes nas principais unidades produtivas do estado. O objetivo foi identificar a diversidade dos sistemas adotados pelos produtores. O levantamento foi conduzido por meio de um questionário semiestruturado aplicado em unidades produtivas de feijoeiro-comum, abrangendo 21 municípios, que juntos representaram 14,7% da área plantada no estado. O plano de amostragem envolveu visitas presenciais a todos os municípios participantes, totalizando 41 entrevistas com produtores indicados pelos técnicos das Casas de Agricultura de cada região. Além disso, foram incorporadas ao estudo as condições pedoclimáticas do feijoeiro utilizando dados de solo e do Zoneamento de Risco Climático (ZARC), conforme as safras do cultivo do feijão.

Os dados obtidos para a obtenção deste resultado foram depositados no repositório Geoinfo (Infraestrutura de dados espaciais da Embrapa) e encontram-se nos links abaixo, no modo restrito, até a publicação do artigo científico, a ser elaborado após a finalização do projeto:

- a) Zoneamento Pedoclimático do Feijão safra das águas no Estado de São Paulo (<https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/11277>);
- b) Zoneamento Pedoclimático do Feijão 2º Safra no Estado de São Paulo (<https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/11279>);
- c) Zoneamento Pedoclimático do Feijão Irrigado no Estado de São Paulo (<https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/11278>).

O sistema de produção do feijão difere em relação à posição geográfica, especialmente os municípios próximos aos estados vizinhos, Minas Gerais e Paraná onde as condições climáticas são distintas e exigem que os produtores adotem sistemas de manejo diversos como preparo do solo, rotação de culturas e época de plantio. Entretanto, apresentam também algumas similaridades, ou seja, a cultivar Dama é preferida independentemente da localização da lavoura, como também a forma de diagnosticar a fertilidade do solo, o processo de comercialização e o uso de bioinsumo.

A aptidão pedoclimática do cultivo do feijão nos municípios estudados para a safra das águas foi boa em 66%, regular em 14,5%, restrita em 2,9% e inapta em 16,5%.

Enquanto que nas safras da seca e irrigada identificadas como boa aptidão foram 57% e 91%, respectivamente, e inapta foram 38,7% e 8,7%, respectivamente.

6.2 Capacitação sobre uso de solubilizadores de fosfato junto aos agentes multiplicadores do estado de São Paulo

A capacitação técnica sobre o uso de microrganismos solubilizadores de fosfato para agentes multiplicadores do estado de São Paulo foi realizada em 18 de novembro de 2025, sob a coordenação do Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva (UNESP/FCA), que apresentou o projeto de pesquisa e seus resultados parciais. O evento contou ainda com a palestra da pesquisadora Dra. Christiane Abreu de Oliveira Paiva (Embrapa Milho e Sorgo), especialista na temática.

A atividade reuniu 48 participantes, entre alunos de pós-graduação, pesquisadores, técnicos da assistência técnica e extensão rural (CATI) e produtores de feijão-comum do estado de São Paulo. A capacitação teve duração total de quatro horas, conforme a seguinte programação:

Programação

Título: “Capacitação técnica em uso de microrganismos solubilizadores de fosfato para agentes multiplicadores do Estado de São Paulo”.

Objetivo: realizar capacitação técnica e atualização em bioinsumos na agricultura.

Público-alvo: produtores rurais, pesquisadores da equipe do projeto, especialistas agropecuários da CATI e alunos de graduação e pós-graduação.

Local: On-line via google meet

Data: 18/11/2025

Horário: período da tarde (14 às 18h)

Abertura e apresentação do projeto “Microrganismos solubilizadores de fosfato e uso eficiente de fósforo no cultivo do feijoeiro-comum”.

Palestrante: Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva - (Professor do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal - FCA/UNESP Botucatu) - Coordenador do Projeto CNPq.

Avanços da pesquisa no uso de bioinsumos na agricultura: uso de microrganismos solubilizadores de fosfato

Palestrante: Dra. Christiane Abreu de Oliveira Paiva - (Pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo)

8. BANCAS E EVENTOS

- 1- Avaliador dos pôsteres no I Simpósio Internacional de Agronomia da UNESP-Tecnologias Avançadas, evento promovido pela Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCA/UNESP) - Campus Botucatu (10/24).
- 2- Workshop ‘Tecnologias Li-cor aplicadas ao estresse hídrico em plantas’ (11/24 – 20 horas).
- 3- Auxílio na organização do workshop ‘IRGA: Da teoria ao campo na análise de trocas gasosas e fluorescência de plantas cultivadas, com foco na tecnologia LI-COR’ (05/25 – 20 horas).
- 4- Pôster “Bacterial inoculation enhances gas exchange and soil phosphorus availability in common bean under phosphate fertilization” XX International Plant Nutrition Colloquium, Porto, Portugal (07/25).
- 5- Pôster “Inoculation with phosphate-solubilizing bacteria improves common bean production under reduced phosphate fertilization” XX International Plant Nutrition Colloquium, Porto, Portugal (07/25).
- 6- Poster “Use of bioinputs in sustainable phosphorus management: effects of *Bacillus* spp. on common bean cultivation” Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária - Siagro 2025, Sao Cos – SP (10/25).
- 7- Avaliador do XXXVII Congresso de Iniciação Científica da UNESP-FCA/Botucatu. “Ciência e liberdade de pensamento em uma época de extremos”. (10/25).
- 8- Membro titular da Comissão Examinadora do Exame de Qualificação de Isadora Malveira Costa Frederico, discente regular do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Agricultura), Curso de Mestrado Acadêmico, cujo trabalho se intitula “Nutrição do feijão-comum”. (12/25).