

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E AMBIENTAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

**SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR *Bacillus velezensis* NA CULTURA DO
MILHO EM DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO**

YASMIM ISABEL RETORE

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL

2024

YASMIM ISABEL RETORE

**SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR *Bacillus velezensis* NA CULTURA DO
MILHO EM DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
bacharel em Biotecnologia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Liliam Silvia
Candido

DOURADOS-MS

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

R438s Retore, Yasmim Isabel
SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR *Bacillus velezensis*
NA CULTURA DO MILHO EM DIFERENTES AMBIENTES
DE PRODUÇÃO [recurso eletrônico] / Yasmim Isabel
Retore. -- 2024.
Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Liliam Silvia Candido.

TCC (Graduação em Biotecnologia)-Universidade Federal
da Grande Dourados, 2024. Disponível no Repositório

Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados
fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

YASMIM ISABEL RETORE

SOLUBILIZACAO DE FÓSFORO POR *Bacillus velezensis* NA CULTURA
DO MILHO EM DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
aprovado pela Banca Examinadora
como requisito parcial para obtenção
do título de bacharel em
Biotecnologia, na Universidade
Federal da Grande Dourados.

Orientadora: Liliam Silvia Candido

Aprovado em: 06 de dezembro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LILIAM SILVIA CANDIDO**
Data: 11/12/2024 10:57:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Liliam Silvia Candido
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **LIVIA MARIA CHAMMA DAVIDE DE CARVALHO**
Data: 11/12/2024 15:27:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Livia Maria Chamma Davide
Membro

Documento assinado digitalmente
 **ELAINE REIS PINHEIRO LOURENTE**
Data: 11/12/2024 11:16:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Elaine Reis Pinheiro Lourente
Membro

Documento assinado digitalmente
 **ALISON FERNANDO NOGUEIRA**
Data: 11/12/2024 21:11:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alison Fernando Nogueira
Membro

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Dirceu, pelo apoio incondicional, e por me ensinar que é possível abraçar todos os desafios da vida, sem se render ao cansaço. À minha mãe, Denise (*in memoriam*), pelo amor, incentivo e apoio que sempre me deu para eu realizar meus sonhos.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Liliam Silvia Candido, por me acolher em todos os pilares da universidade, e me oportunizar a execução do presente trabalho, além de toda orientação e ajuda em desenvolver ideias que elevaram essa pesquisa.

Aos membros do Grupo de Melhoramento Genético e Biotecnologia Vegetal que ajudaram durante a implantação e avaliação do experimento. Sua colaboração foi essencial para a realização do trabalho. Em particular, agradeço ao Hemerson, Amanda, Rayan, Daouda, Thalles, Marco e Igor.

À empresa Biolmput, pelo sedimento do material e parceria. Principalmente ao Dr.^o Alison Fernando Nogueira, por todos os ensinamentos, ajuda e por aceitar compor a banca.

Aos meus amigos, em especial meu irmão, Moisés, por todo o companheirismo, risadas e conversas. Ao Marco, Izadora e M.^a Victória, obrigada por divertirem meus dias e acreditarem em mim. E ao meu companheiro de vida, Eduardo, sem você eu não chegaria aqui.

As professoras Dr.^a Livia Maria Chamma Davide e Dr.^a Elaine Reis Pinheiro Lourente que se disponibilizaram a fazer parte da avaliação final desse trabalho.

Por fim, sou grata a todos que de alguma forma participaram da realização desse trabalho.

RETORE, Yasmim Isabel. **Solubilização de fósforo por *Bacillus velezensis* na cultura do milho em diferentes ambientes de produção**. 2024. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Biotecnologia) – Faculdade de Ciências Biológicas e Ambientais, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2024.

RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) é o grão mais consumido no mundo, utilizado principalmente em rações. Na última safra, o consumo foi equivalente a 98,5% da produção mundial, com o Brasil como terceiro maior produtor e consumidor. Contudo, seu cultivo encara a baixa disponibilidade de fósforo em muitos solos, especialmente os tropicais, exigindo fertilização. A exploração de fosfato enfrenta desafios de sustentabilidade, viabilidade econômica e impacto ambiental. Como alternativa, as biotecnologias, como microrganismos solubilizadores de fósforo, oferecem uma solução promissora para aumentar a disponibilização desse nutriente, promovendo uma agricultura mais sustentável e favorecendo a redução de custos. Assim, este trabalho foi realizado com o intuito de avaliar o impacto do *B. velezensis* na cultura do milho em diferentes localidades e metodologias de aplicação na safra 2023/2024, justificando-se pela necessidade de redução de adubação fosfatada nas lavouras de milho. O mesmo experimento foi conduzido em Dourados, MS, Londrina, PR e Guarapuava, PR em delineamento de blocos casualizados com 4 repetições. Foram avaliados oito tratamentos, incluindo novas doses de *B. velezensis*, para a cultura do milho. As variáveis avaliadas foram o peso de 1000 grãos, produção, eficiência na aquisição de fósforo (EAP), eficiência na utilização de fósforo (EUtP) e eficiência no uso de fósforo (EUsP). Nos municípios de Dourados e Guarapuava as variáveis que apresentaram significância pelo teste F foram EAP e EUsP. Já em Londrina a única variável que não foi significativa foi produção. Nos três ambientes, houve correlação positiva e significativa entre EAP e EUsP. A análise multivariada pelo método de Componentes Principais (ACP) apresentou gráficos de dispersão diferentes para cada ambiente, sugerindo diferença significativa entre os locais, sendo confirmada com a ANOVA conjunta, incluindo os três ambientes, em que a partição da interação foi complexa para todos os pares de ambientes. As novas doses de *B. velezensis* não se mostraram eficientes nos ambientes de Dourados e Londrina. Já em Guarapuava, o tratamento de sementes com concentração de 50mL.50Kg⁻¹ de *B. velezensis* resultou em maior eficiência no uso de fósforo. A ACP foi capaz de demonstrar a diferença entre os locais estudados, explicada pelas variações ambientais de cada localidade, evidenciando a importância de conduzir experimentos em múltiplas regiões.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; eficiência no uso de fósforo, análise de componentes principais, interação tratamentos x ambientes.

ABSTRACT

Corn (*Zea mays L.*) is the most consumed grain in the world, primarily used in animal feed. In the last harvest, consumption was equivalent to 98.5% of global production, with Brazil ranking as the third-largest producer and consumer. However, its cultivation faces the challenge of low phosphorus availability in many soils, particularly tropical ones, requiring fertilization. Phosphate exploitation encounters challenges related to sustainability, economic feasibility, and environmental impact. As an alternative, biotechnologies such as phosphorus-solubilizing microorganisms offer a promising solution to increase the availability of this nutrient, promoting more sustainable agriculture and enabling cost reduction. This study aimed to evaluate the impact of *B. velezensis* on corn crops across different locations and application methodologies during the 2023/2024 growing season, justified by the need to reduce phosphate fertilization in corn fields. The experiment was conducted in Dourados, MS; Londrina, PR; and Guarapuava, PR, using a randomized block design with four replications. Eight treatments were evaluated, including new *B. velezensis* dose proposals for corn cultivation. The evaluated variables included 1,000-grain weight, yield, phosphorus acquisition efficiency (PAE), phosphorus utilization efficiency (PUE), and phosphorus use efficiency (PUE). In Dourados and Guarapuava, the variables that showed significance in the F-test were PAE and PUE. In Londrina, the only variable that was not significant was yield. Across all three environments, there was a positive and significant correlation between PAE and PUE. Multivariate analysis using the Principal Component Analysis (PCA) method showed different dispersion graphs for each environment, suggesting significant differences between locations. This was confirmed by the joint ANOVA across the three environments, where the interaction partition was complex for all pairs of locations. The new *B. velezensis* dose were not effective in the environments of Dourados and Londrina. However, in Guarapuava, seed treatment with a concentration of 50 mL.50Kg⁻¹ of *B. velezensis* resulted in higher phosphorus use efficiency. The PCA was able to demonstrate the differences among the studied locations, explained by the environmental variations of each region, highlighting the importance of conducting experiments in multiple areas.

Keywords: *Zea mays L.*; phosphorus use efficiency, principal component analysis, treatment x environment interaction.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos do solo das áreas experimentais em Dourados, MS (A), Londrina, PR (B) e Guarapuava (C).	19
Tabela 2 - Tratamentos em avaliação utilizados nos campos experimentais em Dourados, MS, Londrina, PR e Guarapuava, PR, na safra 2023/2024.	22
Tabela 3 - Estimativas dos quadrados médios, médias e coeficientes de variação de cinco caracteres de produção e de eficiência do uso de fósforo avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024. Londrina, PR, março/2024. Guarapuava, PR, maio/2024	29
Tabela 4 - Correlação entre cada componente principal e peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações.	38
Tabela 5 - Resumo da Análise de variância conjunta e porcentagem da parte complexa (Robertson, 1959) resultante da decomposição da interação entre ambientes, de cinco caracteres de produção e de eficiência do uso de fósforo avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações.	42
Tabela 6 - Peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B). Guarapuava, PR, maio/2024 (C).	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição das áreas dos experimentos em Dourados, MS (A), Londrina, PR (B) e Guarapuava, PR (C).	18
Figura 2 - Climograma durante o período do experimento em Dourados, MS (A, estação climatológica da Embrapa Agropecuária Oeste (CPAO), Londrina, PR (B, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Londrina) e Guarapuava, PR (C, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Guarapuava). Onde T mín; Temperatura mínima (°C), T max; Temperatura máxima (°C).	21
Figura 3 - Croqui experimental do experimento instalado em Dourados, MS (A), Londrina, PR (B) e Guarapuava, PR (C).	23
Figura 4 - Médias do peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	30
Figura 5 - Médias do peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Londrina, PR, março/2024. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	32
Figura 6 - Médias do peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Guarapuava, PR, Maio/2024. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	34
Figura 7 - Coeficientes de correlação fenotípica e teste de normalidade das características peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B).	

Guarapuava, PR, maio/2024 (C). ***, **, *, estatisticamente diferente de 0 a 0,1%, 1% e 5% pelo teste T, respectivamente..... 36

Figura 8 - Dispersão gráfica em relação aos dois primeiros componentes principais (CPA), com base em variáveis de produção e eficiência do metabolismo de fósforo de plantas de milho sob diferentes adubações, inoculações e locais, de acordo com as variáveis: peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod). Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B). Guarapuava, PR, maio/2024 (C). Componente principal (PCA)..... 39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1	Cultura do milho: origem e características gerais da cultura.....	4
3.1.1	Centro de origem e diversidade.....	4
3.1.2	Morfologia externa.....	5
3.2	Importância socioeconômica e produtividade da cultura do milho.....	8
3.3	Importância do fósforo no desenvolvimento da cultura do milho.....	9
3.4	Disponibilidade de fósforo no solo.....	10
3.5	Bactérias solubilizadoras de fósforo.....	12
3.5.1	Rizosfera.....	12
3.5.2	Bactérias solubilizadoras de fósforo.....	12
3.5.3	Gênero Bacillus spp.....	13
3.5.4	Importância do uso de biofertilizantes.....	14
3.6	Método de inoculação.....	15
3.7	Análise Multivariada por meio de Componentes Principais.....	15
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4.1	Caracterização dos locais de estudo.....	18
4.2	Tratamentos em avaliação.....	22
4.3	Delineamento experimental.....	22
4.4	Características avaliadas.....	24
4.4.1	Determinação de fósforo pelo método de digestão ácida.....	24
4.5	Análises estatísticas.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1	Análise de variância.....	28
5.2	Teste de média das características avaliadas.....	29

5.2.1	Dourados	29
5.2.2	Londrina.....	31
5.2.3	Guarapuava	33
5.3	Teste de normalidade e correlações entre caracteres.....	35
5.4	Análise multivariada	37
5.5	Interação tratamentos x ambientes	41
6	CONCLUSÕES.....	46
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é originário do México, onde seu precursor, o teosinto (*Z. mays parviglumis*), era restrito ao vale do rio Balsas. Atualmente, o grão é amplamente utilizado como ingrediente principal em rações para suínos e aves (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015). O milho é o grão mais consumido no mundo. Na safra de 2023/2024 o consumo foi cerca de 98,5% da produção mundial do grão, que totalizou 1.223,8 milhões de toneladas, sendo o Brasil o terceiro maior produtor, representando cerca de 10% da produção mundial (USDA, 2024). O estado do Paraná é o segundo maior produtor de milho do Brasil, sendo responsável por 12,7% da produção, enquanto isso, o Mato Grosso do Sul é responsável por 6,9%, sendo o quarto maior produtor (CONAB, 2024). A produção do milho teve um aumento significativo em sua produção devido ao melhoramento genético, manejo de culturas e principalmente ao uso de fertilizantes (BYERLEE, 2015). Contudo, o uso excessivo e indiscriminado desses fertilizantes já causou graves problemas ambientais, como eutrofização de ambientes aquáticos, acidificação do solo e poluição do ar (BAVEYE, 2015; SHARMA et al., 2013).

Um dos principais nutrientes que demanda adubação é o fósforo (P), sendo essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, fornecendo energia para reações biossintéticas e processos metabólicos (MALHOTRA et al., 2018; SFREDO, 2008). Apesar das necessidades de fósforo do milho serem menores em comparação com as de nitrogênio e potássio, as doses recomendadas são elevadas, devido à sua elevada fixação no solo (COELHO, 2006). Além disso, a maioria dos solos não fertilizados não libera fósforo suficiente para o desenvolvimento das plantas, sendo crucial a aplicação de P para a produção. Contudo, a recuperação deste nutriente pelas plantas de milho é muito baixa, uma vez que 80% do nutriente se torna imóvel e indisponível para absorção (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998).

Somado a isso, a exploração de fosfato e a produção de fertilizantes fosfatados enfrentam desafios de sustentabilidade, viabilidade econômica e impacto ambiental. Uma vez que, a obtenção de fosfato libera flúor, uma substância tóxica e volátil, além de gerar resíduos que podem causar

eutrofização de ambientes aquáticos e acumular metais pesados no solo, quando vasados. Ademais, com a taxa atual de mineração, estima-se que a reserva de fosfato de rocha será esgotada em cerca de 500 a 600 anos (SHARMA et al., 2013). Além disso, a maior parte das reservas está concentrada em poucas áreas, tornando muitos países dependentes de importações para atender à demanda de fósforo (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009).

Logo, diante desta realidade, a aplicação de inoculantes microbianos é uma alternativa ecologicamente sustentável ao uso de fertilizantes químicos tradicionais, com baixo custo e fontes renováveis de nutrientes, oferecem uma solução viável para a agricultura, contribuindo para a redução dos custos de produção (GOMES et al., 2011; SOUZA; AMBROSINI; PASSAGLIA, 2015). Um dos principais gêneros de bactérias com uso agrícola é o *Bacillus*, por promover bioproteção, fixação de nitrogênio, solubilização de nutrientes, síntese de fitohormônios e melhoria das condições do solo, contribuindo para o desenvolvimento das culturas (IGIEHON; BABALOLA; HASSEN, 2024; KHAN et al., 2022). A espécie *Bacillus velezensis* tem se mostrado eficaz na promoção do crescimento vegetal, solubilização de fósforo e biocontrole para soja, milho (MOSELA et al., 2022), ervilha (BAYISA, 2023) e trigo (AFZAL et al., 2023).

2 OBJETIVOS

- 1) Investigar se a espécie *Bacillus velezensis* em diferentes doses altera o crescimento e solubilização de fósforo para a cultura do milho, em condições de campo na safra 2023/2024.
- 2) Avaliar dois diferentes métodos de inoculação de *Bacillus velezensis* na cultura do milho, em condições de campo, na safra 2023/2024.
- 3) Indagar sobre o efeito de *Bacillus velezensis* no desenvolvimento e promoção de crescimento de milho, em condições de campo, nos municípios de Dourados, MS, Londrina, PR, e Guarapuava, PR.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Cultura do milho: origem e características gerais da cultura

3.1.1 Centro de origem e diversidade

O primeiro registro da cultura do milho (*Zea mays* L.) no continente americano foi realizado em 1492 por Colombo na costa de Cuba, sendo a cultura cultivada na extensão do centro estadunidense até o norte argentino (MANGELSDORF, 1974). Contudo, evidências arqueológicas indicam que o milho é mais antigo no México, além do teosinto (*Z. mays parviglumis*), considerado o precursor da cultura do milho moderno, se restringir a áreas sul mexicanas, mais especificamente no vale do rio Balsas (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

Conforme o milho foi sendo domesticado e disperso pelo globo, ele passou por processos de melhoramento diferente em cada linha geográfica. No Brasil, registros de 1500 relatam que os milhos cultivados eram brancos e duros, mas comumente eram encontrados grãos amarelo claro, roxo ou vermelho. Já relatos de 1700 indicam que os povos indígenas paraguaios cultivavam milho branco, milho pipoca pontudo e milho farináceo branco. Na Colômbia e Venezuela eram cultivados milho doce e milho pipoca pontudo. E, os indígenas estadunidenses e sul-canadenses cultivavam milhos com espigas compridas, grãos duros e farináceos, representados por milhos doces (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015; SMITH; BETRÁN; RUNGE, 2004).

O estágio vegetativo (VE) no milho é marcado pelo surgimento e abertura das folhas cotiledonares. No estágio V1, ocorre a abertura da primeira folha acompanhada pela lígula. Durante os estádios V1 a Vn, observa-se o desenvolvimento progressivo das folhas, com a lígula tornando-se visível à medida que novas folhas se expõem completamente. Assim, a numeração dos estádios aumenta conforme o surgimento de cada nova folha (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015; MAGALHÃES; DURÕES, 2006).

Já os estádios reprodutivos do milho têm início com o aparecimento da inflorescência masculina, caracterizando o estágio VT. No estágio R1, ocorre a emergência dos estigmas (embonecamento) e a subsequente polinização dos óvulos. O estágio R2 é identificado pelo escurecimento dos estilos-estigmas e

pelo início do enchimento dos grãos, os quais apresentam aproximadamente 85% de umidade nesse estágio. O enchimento dos grãos prossegue nos estádios R3 a R6, sendo o estágio R6 considerado como a fase de maturidade fisiológica (MAGALHÃES; DURÕES, 2006). Nesta fase, forma-se uma camada escura na base do grão, indicando a cessação da transferência de fotoassimilados da planta para os grãos (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

O crescimento e desenvolvimento do milho são fortemente influenciados por fatores climáticos como disponibilidade de água, temperatura e luminosidade. Para que a cultura do milho alcance seu pleno potencial genético, é essencial que as condições climáticas sejam adequadas. Isso inclui a manutenção de temperaturas ideais, níveis apropriados de precipitação e condições de fotoperíodo que favoreçam o desenvolvimento ideal das plantas. A combinação ideal desses fatores climáticos é crucial para otimizar a produtividade do milho. Nos estados do Centro Oeste e Sudeste do Brasil, a época de semeadura varia de outubro a novembro, com colheita nos meses de março a início de maio (CRUZ et al., 2006). Além disso, existe a possibilidade de plantio do milho de sequeiro, também chamado de safrinha e segunda safra, o qual é semeado de janeiro a abril, após a cultura de verão, na região Centro-Sul brasileira. Atualmente, quase toda a produção estadual de milho em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul é oriunda do plantio na safrinha (CRUZ et al., 2011).

3.1.2 Morfologia externa

Morfologicamente a planta de milho é dividida em duas partes principais uma localizada acima da superfície do solo constituída por caule, folhas, pendão e espiga e outra área formada pelo sistema radicular (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015). Este último inicia seu desenvolvimento a partir da base do primeiro internódio da plântula, emergindo da semente e se desenvolve em qualquer direção (exceto para cima), a fim de realizar o estabelecimento inicial da plântula. Posteriormente as raízes primárias ou seminais desenvolvem-se a partir da semente, estas últimas são pouco ramificadas e são responsáveis pela nutrição da planta até o sistema radicular se estabelecer (surgimento das raízes secundárias) (KIESSELBACH, 1949). Após o estágio V3 o crescimento da

radícula e das raízes seminais laterais é praticamente nulo, e o desenvolvimento dos pelos radiculares inicia (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

O sistema radicular secundário é o principal responsável pela nutrição da planta, desenvolvendo-se no estágio V6, entre o 4º e o 6º nós abaixo da superfície do solo. As raízes adventícias, por sua vez, emergem a partir dos nós situados acima da superfície do solo, sendo mais ativas no final do ciclo vegetativo. Estas raízes desempenham um papel crucial na sustentação da planta e, em alguns casos, podem absorver água e nutrientes da camada superficial do solo. Na planta adulta de milho, aproximadamente 75% do sistema radicular está concentrado na camada superficial do solo, até uma profundidade de 20 cm (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015). Devido a este hábito superficial de radiação, a cultura possui pouca tolerância à seca (KIESSELBACH, 1949).

O colmo desempenha um papel essencial ao fornecer suporte às demais partes da planta que se encontram acima do solo, além de atuar como estrutura de armazenamento, podendo contribuir com 5% a 50% dos fotoassimilados durante a fase de enchimento dos grãos. Seu crescimento ocorre pela alongação dos internódios, determinando assim a altura final da planta, a qual é influenciada tanto pelo número de nós (variando entre 10 e 25) quanto pelo comprimento dos entrenós. Dessa forma, a altura da cultura pode variar desde um metro em linhagens específicas até quatro metros em híbridos mais antigos. O diâmetro do colmo varia entre 15 e 80 mm, diminuindo conforme se aproxima do ápice. Além disso, devido a fatores genéticos, de manejo e ambientais, pode ocorrer o perfilhamento da planta, resultando na formação de mais de um colmo (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

Em cada nó do caule do milho ocorre a emergência de uma folha, totalizando entre 10 e 25 folhas por planta. Essas folhas são alternadas, lanceoladas, lisas e possuem cerosidade, podendo estar posicionadas horizontal ou verticalmente em relação ao colmo. Anatomicamente, a folha é composta pela bainha e pela lâmina foliar (limbo foliar). A lâmina apresenta nervuras paralelas ramificadas a partir de uma nervura central mais espessa no sentido longitudinal (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015). Na junção entre a bainha e a lâmina, encontram-se duas estruturas plumosas chamadas aurículas, que permitem a mobilidade lateral da folha. Na base da lâmina localiza-se a lígula, estrutura que

pressiona contra o colmo, impedindo a entrada de agentes externos e reduzindo a evapotranspiração (KIESSELBACH, 1949). O desenvolvimento das folhas é determinado no estágio V3 e completa-se no estágio V5. A folha mais alta, conhecida como folha bandeira, serve como ponto de referência para a medição da altura da planta (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

O milho é uma planta monóica, ou seja, as flores femininas (espigas) e masculinas (pendão) são distribuídas em diferentes partes da planta. O pendão, localizado na porção superior, é constituído por um eixo central e suas ramificações. Essas ramificações são compostas por espiguetas, sendo uma séssil e outra pedicelada, cada qual abrigando duas flores, cada uma com três anteras responsáveis pela liberação dos grãos de pólen (ANDERSON, 1951). A espiga, por sua vez, é um ramo lateral modificado, composto por sabugo, grãos e palha. Ao longo do sabugo, encontram-se fileiras de espiguetas que dão origem aos grãos. Cada óvulo possui um estilo-estigma que se estende para fora da palha, facilitando a fertilização. Cada espiga se desenvolverá em um nó, exceto nos últimos 6 a 8 nós abaixo do pendão. As inflorescências femininas situadas nas posições mais baixas do colmo tendem a crescer mais lentamente, resultando no desenvolvimento predominante de uma ou duas espigas produtivas nas posições superiores. Quando duas ou mais espigas se desenvolvem, a planta é considerada prolífica (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

Por fim, o grão de milho é do tipo cariopse, característico de gramíneas, possui peso individual médio entre 0,25 e 0,30 g e é composto por quatro partes distintas: pedicelo, pericarpo, embrião e endosperma, constituídas principalmente de amido, óleos e proteínas (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015). O pericarpo, derivado da parede do ovário, tem a função de proteger o grão contra condições climáticas adversas, insetos e microrganismos, além de internamente, o grão abrigar o endosperma e o embrião. O embrião é constituído por quatro estruturas principais: radícula, hipocótilo, plúmula e coleótilo, que têm o potencial de originar uma nova planta. O endosperma, por sua vez, é triploide, sendo originado da fusão de dois núcleos femininos e um masculino (KIESSELBACH, 1949). É formado por quatro componentes: aleurona, subaleurona, endosperma vítreo e endosperma farináceo. Os dois últimos

correspondem a 82% do peso seco do grão, sendo o amido responsável por mais de 70% dessa composição. Ainda, os grãos de milho podem ser classificados em dentados, semidentados e duros, sendo o tipo duro o mais predominante no Brasil (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

3.2 Importância socioeconômica e produtividade da cultura do milho

O grão de milho é composto por diversas frações, cada uma com funções específicas. O endosperma é majoritariamente composto por amido (88%) e proteínas de reserva chamadas zeínas. Essas proteínas, responsáveis por envolver os grânulos de amido, permitem que o endosperma seja classificado como farináceo ou vítreo, com carotenóides presentes na camada de aleurona e no endosperma vítreo, conferindo a coloração ao grão (PAES, 2006).

O gérmen, representando cerca de 11% do grão, é rico em lipídios, incluindo óleo e vitamina E, além de proteínas, minerais e açúcares. Esta parte é a única porção viva do grão e contém proteínas distintas das encontradas no endosperma, com importantes funções nutricionais e tecnológicas. O óleo do gérmen é similar ao de soja e girassol, sendo rico em ácidos graxos essenciais. O pericarpo, responsável por proteger o grão, compõe 5% de sua estrutura e é feito principalmente de hemicelulose e celulose. A ponta, que liga o grão ao sabugo, representa 2% do grão e é composta por material lignocelulósico (PAES, 2006; SERNA-SALDIVAR, 2019).

O milho é amplamente utilizado como ingrediente principal em rações para animais monogástricos, com sua demanda diretamente vinculada ao crescimento da produção de suínos e aves. Embora sua função principal seja fornecer energia por meio do amido presente nos grãos, o milho também desempenha um papel fundamental como matéria-prima em diversos setores industriais. Na alimentação humana, aproximadamente 15% da produção mundial é destinada ao consumo direto, mas seu uso em uma ampla variedade de produtos torna o milho essencial para a nutrição global e para a indústria alimentícia (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

O milho é o grão mais consumido no mundo. Na última safra (2023/2024) o consumo foi de 1.205,8 milhões de toneladas, consumindo cerca de 98,5% da produção mundial da mesma safra (USDA, 2024). A produção mundial de milho

na safra 2023/2024 foi de 1.223,8 milhões de toneladas, sendo o maior produtor os Estados Unidos da América, sendo este responsável por cerca de 31,8% da produção total (389,7 milhões de toneladas). Com uma produção de 288,8 milhões de toneladas (aproximadamente 23,6%) a China fica em segundo lugar na produção de milho. Já o Brasil ocupa a terceira colocação, sendo responsável por cerca de 10% da produção mundial (122,0 milhões de toneladas) (USDA, 2024).

O maior produtor brasileiro de milho é o estado do Mato Grosso, com uma produção de 48,41 milhões de toneladas (39,7% da produção nacional), com uma produtividade de 6.860 kg/ha. Em segundo lugar, produzindo 15,46 milhões de toneladas (12,7%), está o Paraná com uma produtividade de 5.500 kg/ha. Na terceira colocação está o estado de Goiás, com uma produção de 10,96 milhões de toneladas (9,0%) e produtividade de 6.520 kg/ha. O estado do Mato Grosso do Sul é responsável por 8,38 milhões de toneladas (6,9%), sendo o quarto maior produtor de milho do Brasil, com uma produtividade de 3.980 kg/ha (CONAB, 2024).

Cerca de 60% do milho produzido em escala mundial é destinado ao consumo animal, ou seja, produção de rações. Apenas 13,4% dos grãos de milho *in natura* são utilizados na alimentação humana, e cerca de 15,5% é destinado a produção de etanol de segunda geração (CONTINI et al., 2019). Por fim, o Brasil é o terceiro maior consumidor de milho do mundo, sendo responsável por utilizar 79,50 milhões de toneladas da produção mundial. Além disso, é o segundo maior exportador do grão, sendo responsável por fornecer cerca de 26,25% do milho consumido mundialmente, ficando apenas atrás dos Estados Unidos da América (USDA, 2024).

3.3 Importância do fósforo no desenvolvimento da cultura do milho

O fósforo (P) desempenha um papel crucial na fisiologia das plantas, estando presente em diversos compostos, como ésteres de carboidratos (que se originam da degradação respiratória de açúcares), nucleotídeos, RNA e DNA, fosfolipídios, ácido fítico (uma forma de armazenamento de fósforo e outros macronutrientes nas sementes) e fosfatos de adenosina (AMP, ADP, ATP). A principal função do fósforo no metabolismo vegetal é fornecer energia para

reações biossintéticas e processos metabólicos, sendo fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas (MALHOTRA et al., 2018; SFREDO, 2008).

Quando o P absorvido pela planta não é imediatamente metabolizado, ele é armazenado no vacúolo celular. Em condições de deficiência de P, o elemento pode ser mobilizado a partir das reservas vacuolares, sendo redistribuído para os órgãos mais jovens da planta. Esse processo de remobilização é crucial para a manutenção do crescimento nas regiões em desenvolvimento (SFREDO, 2008; VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003).

Apesar das necessidades de fósforo do milho serem menores em comparação com as de nitrogênio e potássio, as doses recomendadas para este nutriente são geralmente elevadas. Isso se deve à baixa disponibilidade do fósforo no solo, que é de apenas 20 a 30% (COELHO, 2006). A deficiência de fósforo no milho inicialmente se manifesta nas folhas mais velhas, que assumem uma tonalidade verde mais escura do que o habitual. Com o avanço da carência, essas folhas desenvolvem coloração vermelha ou arroxeadas nas extremidades e nas bordas, devido ao acúmulo de antocianinas, e essa coloração pode eventualmente se estender até o colmo. Além disso, a planta apresenta uma redução geral no crescimento (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2015).

A safra de milho 2022/2023 foi a última com dados registrados sobre o custo de produção. Durante este período, o produtor de milho no Mato Grosso do Sul investiu, em média, R\$ 3.215,32 por hectare em fertilizantes, representando cerca de 41% do custo total de produção. Este valor corresponde a um equivalente de 42,87 sacas de milho por hectare (APROSOJA, 2023).

3.4 Disponibilidade de fósforo no solo

O fósforo prontamente disponível para as plantas é denominado P-solução, sendo caracterizado como a fração solúvel em água. Quando há um aumento na concentração de P-solução, ocorre o processo de adsorção, no qual o fósforo é retido nas superfícies do solo, formando o P-lábil, que atua como uma reserva de fósforo para a solução do solo. Em condições de alta concentração de P-lábil, este pode ser convertido em P não-lábil por meio do processo de fixação, resultando na formação de compostos insolúveis e indisponíveis para as

plantas. A liberação do P-lábil a partir do P não-lábil é um processo extremamente lento, sendo influenciado por fatores como a atividade de microrganismos solubilizadores de fósforo, o pH e a umidade do solo (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

Assim, muitas vezes a quantidade de P no solo pode ser alta, contudo, frequentemente está em formas indisponíveis ou as formas disponíveis estão fora da rizosfera. Além disso, poucos solos que não são fertilizados liberam quantidade de P suficientes para o crescimento da planta. Portanto, atualmente, a aplicação de P ao solo é necessária para a produção, contudo, a recuperação deste nutriente pelas plantas é muito baixa, uma vez que 80% do P se torna imóvel e indisponível para absorção devido a reações como adsorção, precipitação ou conversão para a forma orgânica (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998). Além disso, a taxa de difusão de P é lenta quando comparada a outros macronutrientes, assim as altas taxas de absorção da planta criam uma zona ao redor da raiz que é esgotada de P (MASSUCATO et al., 2022).

A forma de P mais facilmente acessada pelas plantas é o fósforo inorgânico (Pi), logo, P ligados a átomos de C não são absorvidos. A concentração de Pi no solo muda de acordo com o pH (VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003). Abaixo de pH 6,0, a maior parte de Pi estará presente na forma monovalente H_2PO_4^- , enquanto H_3PO_4 e HPO_4^{2-} estarão presentes apenas em proporções menores (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998).

Devido à dificuldade na absorção de nutrientes, as plantas desenvolveram transportadores especializados na interface raiz/solo para extração de Pi de soluções de concentrações micromolares. Além de outros mecanismos para transportar Pi através de membranas entre compartimentos intracelulares, onde as concentrações de Pi podem ser 1000 vezes maiores do que na solução externa. Também desenvolveram sistemas de efluxo que desempenham um papel na redistribuição quando o P do solo não está mais disponível ou não é adequado (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998; VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003).

Sob condições fisiológicas normais, o transporte de fosfato inorgânico (Pi) através da membrana plasmática das células radiculares para o citoplasma da

planta requer energia (transporte ativo). Isso ocorre devido à alta concentração de Pi no citoplasma e ao potencial negativo característico das membranas celulares vegetais. Quando o Pi é absorvido, ele provoca uma despolarização da membrana plasmática e acidificação do citoplasma. Para equilibrar a carga elétrica durante a absorção de Pi na forma de H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-} , é necessário o cotransporte de cátions (íons carregados positivamente) H^+ , que acompanham o fosfato. Esse cotransporte assegura que a carga negativa do fosfato seja contrabalançada adequadamente, mantendo a homeostase celular e prevenindo a geração de potenciais elétricos excessivos, que poderiam ser prejudiciais à célula (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998; VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003).

3.5 Bactérias solubilizadoras de fósforo

3.5.1 Rizosfera

A rizosfera é um ecossistema complexo, caracterizado por uma abundante e diversificada população microbiana, em constante equilíbrio dinâmico, que influencia significativamente as propriedades biológicas, físicas e químicas do solo (HALDAR; SENGUPTA, 2015; LENNON; JONES, 2011). Nesse ambiente, as bactérias promotoras de crescimento vegetal desempenham um papel crucial ao melhorar o desempenho das culturas. Elas atuam por meio da produção de uma variedade de compostos, como antibióticos (COMPANT; CLÉMENT; SESSITSCH, 2010), fixadores de nitrogênio, solubilizadores de fósforo (SOUZA; AMBROSINI; PASSAGLIA, 2015), fitohormônios, ACC deaminase e sideróforos (ULLAH et al., 2019), contribuindo para o desenvolvimento saudável das plantas.

3.5.2 Bactérias solubilizadoras de fósforo

As bactérias solubilizadoras de fosfato (PSB - Phosphate Solubilizing Bacteria) desempenham um papel crucial na disponibilização de fósforo para as plantas através da liberação de ácidos orgânicos, como o ácido glucônico. Esses ácidos orgânicos reduzem o pH do solo e das células microbianas, além de promoverem a substituição de íons metálicos como cálcio (Ca), alumínio (Al) e ferro (Fe), que normalmente formam complexos de fósforo insolúveis, facilitando

assim a disponibilização desse nutriente pelas plantas (CHENG et al., 2023; PAN; CAI, 2023; SHARMA et al., 2013).

A atividade de enzimas fosfatases também é fundamental para a solubilização do fósforo orgânico presente no solo, através do processo de mineralização. Essas fosfatases, que podem ser ácidas, neutras ou alcalinas dependendo do pH em que atuam, são capazes de hidrolisar ligações éster-fosfato, convertendo compostos de fósforo orgânico de alto peso molecular em formas de baixo peso molecular, liberando íons fosfato (PAN; CAI, 2023; SHARMA et al., 2013).

3.5.3 Gênero *Bacillus* spp.

O gênero *Bacillus* é composto por bactérias Gram-positivas, de forma bastonete, com capacidade flagelada e que podem ser aeróbias ou anaeróbias facultativas. Estas bactérias produzem endósporos que conferem resistência a condições ambientais adversas (CHEN et al., 2020; TOWNSLEY et al., 2016). Na agricultura, as espécies do gênero *Bacillus* desempenham um papel significativo devido às suas interações simbióticas com as plantas, além de possuírem características industrialmente interessantes, como tempo de prateleira superior quando comparado a outros gêneros, facilitando o transporte e manipulação desses microrganismos. Elas promovem bioproteção por meio da produção de sideróforos, enzimas, antibióticos e compostos orgânicos voláteis. Além disso, estas bactérias aumentam a fixação de nitrogênio, solubilizam nutrientes, sintetizam fitohormônios e melhoram as condições do solo, contribuindo assim para o desenvolvimento saudável das culturas (IGIEHON; BABALOLA; HASSEN, 2024; KHAN et al., 2022).

Em especial, a espécie *Bacillus velezensis* já foi relatada como efetiva na promoção de crescimento vegetal, solubilização de fósforo e biocontrole em experimentos conduzidos em Londrina, Maringá e Guarapuava, para soja e milho (MOSELA et al., 2022). Apresentou solubilização de fósforo em testes com ervilha (BAYISA, 2023) e soja (VITORINO et al., 2024), além de também promover crescimento vegetal em trigo (AFZAL et al., 2023). Contudo, não há estudos dessa espécie em regiões do centro-oeste brasileiro para nenhuma cultura.

3.5.4 Importância do uso de biofertilizantes

Atualmente, o fosfato é obtido principalmente a partir de fosfato de rocha, que é processado e frequentemente combinado com ácido sulfúrico, nitrogênio e potássio para a produção de fertilizantes minerais (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009a). Os processos para obtenção de fosfato contribuem para a liberação de flúor na forma de gás, uma substância extremamente volátil e tóxica, além de gerar resíduos como o fosfogesso que, caso vazado, pode provocar a eutrofização dos ambientes aquáticos, e promover o acúmulo de metais pesados, como o cádmio, no solo. Por fim, na taxa de mineração atual (cerca de 7.100 milhões de toneladas/ano) estima-se que a reserva de fosfato de rocha será esgotada em cerca de 500 a 600 anos. Assim, a exploração de fosfato e a produção de fertilizantes à base de fósforo enfrentam sérias limitações em termos de sustentabilidade e viabilidade econômica, além de serem ambientalmente prejudiciais (SHARMA et al., 2013).

Outrossim, o excesso da adição de fertilizante inorgânico pode causar problemas ambientais, levando ao acúmulo de metais pesados no solo, contaminação de águas subterrâneas e eutrofização de fontes hídricas (BAVEYE, 2015). Além disso, uma proporção significativa das reservas de rochas fosfáticas para extração mineral está concentrada em uma área pequena, principalmente no Marrocos e no Saara Ocidental. Tornando muitos países dependentes de importações para suprir suas demandas de P, o que, quando somado a conflitos nacionais, aumenta os custos de aquisição e compromete a segurança alimentar (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009).

Logo, diante desta realidade, a aplicação de inoculantes microbianos surge como uma alternativa ecologicamente sustentável em relação ao uso de fertilizantes químicos tradicionais. Estes biofertilizantes, de baixo custo e fontes renováveis de nutrientes, oferecem uma solução viável para a agricultura, contribuindo para a redução dos custos de produção. Além disso, os biofertilizantes podem ser utilizados tanto no tratamento de sementes quanto na aplicação direta ao solo, promovendo a eficiência e a sustentabilidade agrícola (GOMES et al., 2011; SOUZA; AMBROSINI; PASSAGLIA, 2015).

3.6 Método de inoculação

A inoculação é o processo pelo qual microrganismos são colocados em contato com sementes ou a planta, de forma a potencializar a interação planta-microrganismos podendo ser benéfica à planta. Atualmente os métodos de inoculação mais empregados são: inoculação na semente, inoculação no sulco, inoculação na raiz e inoculação foliar (LOPES et al., 2021). Estudos em soja (CAMPO et al., 2010; ZILLI et al., 2010) e milho (MÜLLER et al., 2016) relatam que a inoculação na semente ou no sulco de plantio não alteram o sucesso da interação.

No método de tratamento de semente, as sementes devem ser imergidas em uma solução com concentração de microrganismo conhecida. Quando os microrganismos colonizam as sementes, alguns têm a capacidade de sintetizar giberelinas, que são fitormônios que aceleram a germinação, e de produzir compostos antimicrobianos que protegem as sementes contra fitopatógenos. O inóculo, uma vez no solo, pode permanecer dormente até ser ativado pelas raízes da planta. Embora a inoculação através de sementes seja amplamente utilizada, a eficácia do inóculo pode ser comprometida por fatores como armazenamento inadequado, exposição à luz, altas temperaturas, tratamentos químicos e compostos aleloquímicos liberados durante a germinação de certas espécies, sendo, assim o método de inoculação mais trabalhoso para o produtor rural (LOPES et al., 2021).

O método de inoculação no sulco envolve a introdução de microrganismos no solo por meio de irrigação, incorporação no substrato ou o uso de microcápsulas. Uma vez no solo, esses microrganismos irão colonizar a rizosfera, estabelecendo uma relação simbiótica mutualística com a planta. Nesta zona, eles realizam atividades essenciais como a solubilização de fosfato, a produção de sideróforos e a sinalização que modula a síntese de fitohormônios (LOPES et al., 2021).

3.7 Análise Multivariada por meio de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP), é um método de análise multivariado, que foi inicialmente descrito por Karl Pearson em 1901 e posteriormente consolidada por Harold Hotelling nos anos de 1933 e 1936. Essa

técnica é utilizada para examinar estruturas de correlações entre variáveis, com o objetivo de reduzir o número de caracteres analisados, facilitando a interpretação e destacando um sentido biológico subjacente. O que pode facilitar a identificação e eliminação de variáveis que pouco contribuem para a variabilidade dos tratamentos, além de possibilitar o agrupamento de tratamentos semelhantes por meio de representações e interpretações visuais em dispersões gráficas no espaço bi ou tridimensional (CHATFIELD; COLLINS, 1980; GONÇALVES; FRITSCHÉ-NETO, 2012; MINGOTI, 2005).

Nesse método, as variáveis originais são substituídas por variáveis abstratas ou estatísticas, denominadas Componentes Principais (CPs), cada uma oriunda da combinação linear das variáveis originais. Espera-se que os primeiros componentes capturem a maior parte da variabilidade presente nos caracteres iniciais. Ademais, os CPs são mutuamente independentes, o que implica em sua ortogonalidade e permite a análise de distintas dimensões dos dados. Esse processo assegura que a transformação das variáveis originais nos CPs não resulte em nenhuma perda de informação (CHATFIELD; COLLINS, 1980; GONÇALVES; FRITSCHÉ-NETO, 2012; MINGOTI, 2005).

Cada variável original, irá possuir um coeficiente em relação a cada componente principal, o qual se vincula as outras variáveis incluídas na análise, e indica a contribuição da variável original para o respectivo componente. Logo, para cada conjunto com variáveis diferentes, os coeficientes estimados irão variar, ainda que os tratamentos sejam os mesmos entre os conjuntos. Ademais, os componentes principais também possuem coeficientes, denominados de elementos de autovetores (GONÇALVES; FRITSCHÉ-NETO, 2012).

Adicionalmente, cada componente principal possui um autovalor, este corresponde a quantidade de variância total original retida pelo respectivo CP. Esses autovalores decrescem do primeiro ao último CP, ou seja, os primeiros componentes principais são mais importantes que os últimos, pois a importância de cada CP é dada pela porcentagem de variância que retém. Nesse sentido, é importante ressaltar que o primeiro CP captura a maior parte da variância total, logo, será o mais relevante por explicar a maior variabilidade dos dados originais (CHATFIELD; COLLINS, 1980; GONÇALVES; FRITSCHÉ-NETO, 2012;

MINGOTI, 2005; CHATFIELD; COLLINS, 1980; GONÇALVES; FRITSCHENETO, 2012; MINGOTI, 2005).

Por fim, o número de componentes principais necessários para reter completamente a informação retida num conjunto de dados é, em geral, igual ao número de variáveis originais. Contudo, os primeiros componentes principais contêm a maior parte da variância, e podem ser usados para descrever o comportamento dos tratamentos (GONÇALVES; FRITSCHENETO, 2012).

O uso de ACP foi efetivo para detectar a diferença ambiental entre tipos de adubações para estudos de eficiência do uso de fósforo por diferentes genótipos de batata (SANDAÑA, 2016), algodão (IQBAL et al., 2023) e trigo (YANG et al., 2022). Sugerindo a possibilidade de utilização da Análise de Componentes Principais para identificação da diferença entre ambientes e dos tratamentos promissores no presente estudo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização dos locais de estudo

Três experimentos idênticos foram conduzidos, em campo, em três diferentes locais, sendo: Dourados, MS, Londrina, PR e Guarapuava, PR, durante a safra das águas 2023/2024. Em Dourados o experimento foi conduzido entre os meses de novembro de 2023 e abril de 2024, em área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizado em Dourados - MS, com coordenadas geográficas $22^{\circ}13'55''S$ $54^{\circ}59'31''O$ a 410m do nível do mar (Figura 1 A).



Figura 1 - Disposição das áreas dos experimentos em Dourados, MS (A), Londrina, PR (B) e Guarapuava, PR (C).

No município de Londrina, PR o experimento foi conduzido entre os meses de novembro de 2023 e março de 2024, em área da Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina (UEL), com coordenadas geográficas $23^{\circ}20'21''S$ $51^{\circ}12'23''O$ a 521m do nível do mar (Figura 1 B). Também no Paraná, o experimento instalado em Guarapuava foi conduzido entre os meses de novembro de 2023 e maio de 2024, na Fazenda Experimental da Universidade

Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), nas coordenadas 25°22'58"S 51°33'10"O a 970m do nível do mar (Figura 1 C).

O tipo de solo predominante em Dourados é o Latossolo Vermelho Distroférico (AMARAL et al., 2000), caracterizado por ser muito argiloso, possuir baixa fertilidade natural, alta capacidade de retenção de fósforo devido à presença de óxidos de ferro e alumínio, e são solos bem drenados (IMASUL; SEMADE, 2016). Em Londrina o solo predominante é o Latossolo Vermelho Escuro Eutroférico (OLIVEIRA et al., 2024), sendo um solo com elevada fertilidade natural, além de possuir elevada retenção de nutrientes devido a capacidade de troca de cátions, são argilosos a muito argilosos (IMASUL; SEMADE, 2016). Já o tipo de solo Argissolo Vermelho Amarelo caracteriza a região de Guarapuava, esse é caracterizado por ser intemperizado, possuindo fertilidade baixa a moderada, possuem textura contrastante, variando de média a argilosa (OLIVEIRA et al., 2024). As características químicas do solo das áreas experimentais de Dourados, Londrina e Guarapuava estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos do solo das áreas experimentais em Dourados, MS (A), Londrina, PR (B) e Guarapuava (C).

Locais	pH	M.O. g.dm ⁻³	cmolc.dm ⁻³						Teor de Argila	mg.dm ⁻³
	CaCl ₂		K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB		P
A	5,26	22,18	0,42	3,67	1,54	0	3,44	5,63	64%	13,79
B	5,12	57,65	0,65	5,75	2,05	0	5,84	8,47	61%	11,71
C	4,37	35,27	0,29	1,77	0,86	0,7	7,10	2,92	59%	2,29

CaCl₂; Cloreto de Cálcio, M.O.; Matéria orgânica, K; Potássio, Ca; Cálcio, Mg; Manganês, Al; Alumínio; H+Al; Acidez total, SB; Soma de bases trocáveis, e P; fósforo.

O clima da região de Dourados é classificado como Cwa de acordo com a classificação de Köppen (FIETZ; FISCH, 2008), ou seja, possui clima mesotérmico úmido, verões quentes e invernos secos (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTRELHAS, 2002). Já para a região de Londrina, o clima é classificado como Cfa (NITSCHKE et al., 2019), apresentando verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de mais chuvas no verão, sem apresentar uma estação seca definida (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTRELHAS, 2002). Já, a região de Guarapuava possui o clima classificado como subtropical úmido mesotérmico (Cfb) (NITSCHKE et al., 2019), possuindo verões pouco quentes, com chuvas

distribuídas ao longo do ano e sem estação de estiagem (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTRELHAS, 2002).

Após a implementação do experimento em Dourados observou-se uma precipitação de apenas 9,20 mm, com temperaturas máximas e mínimas de 36,28 °C e 29,60 °C, respectivamente, o que resultou na necessidade de irrigação de emergência durante três dias. Subsequentemente, houve um aumento na pluviosidade até o experimento completar um mês de instalação. No entanto, após esse período, foi registrado uma estiagem de três semanas, com uma precipitação de 4,5 mm e temperaturas variando entre 26,26 °C e 32,50 °C. A partir disso, as condições climáticas foram estabilizadas, com variações entre semanas chuvosas e períodos curtos de estiagem até a colheita. A temperatura mínima média foi de 26,74°C e máxima de 33,32°C, havendo uma diferença de apenas 6,50°C entre as duas medidas. Já as chuvas mensais variaram de 69,00 mm a 128,2 mm, apresentando média de 85,12 mm (Figura 2 A).

No momento da instalação do experimento em Londrina, as chuvas foram mais intensas e uniformes, além das temperaturas médias se apresentarem menores em comparação com Dourados. O quarto mês do experimento registrou a maior pluviosidade, atingindo 175,6 mm. Entretanto, ao longo de todos os meses em que o experimento foi conduzido em campo, foram registradas chuvas superiores a 134 mm e média de 155,28 mm, o que indica a ausência de períodos de estiagem e uma pluviometria abundante. Ademais, as temperaturas mínimas médias alcançaram 20,25°C, enquanto a temperatura média máxima foi de 32,30°C, uma diferença de 12,05°C (Figura 2 B).

Por fim, a temperatura e a pluviosidade em Guarapuava, durante o período em que o experimento esteve instalado, demonstraram-se uniformes, com temperaturas médias inferiores às de Londrina e Dourados. O segundo mês apresentou a menor pluviosidade, registrando 107,6 mm, enquanto a média mensal de precipitação foi de 170,27 mm, com o quarto mês alcançando o maior índice pluviométrico (225,6 mm). A temperatura média máxima foi de 27,93°C, e a mínima, de 16,94°C, resultando em uma diferença de 10,99°C. Assim, observou-se que os dias em Guarapuava foram mais frios, mas com uma variação térmica diária menos acentuada do que Londrina (Figura 2 C).

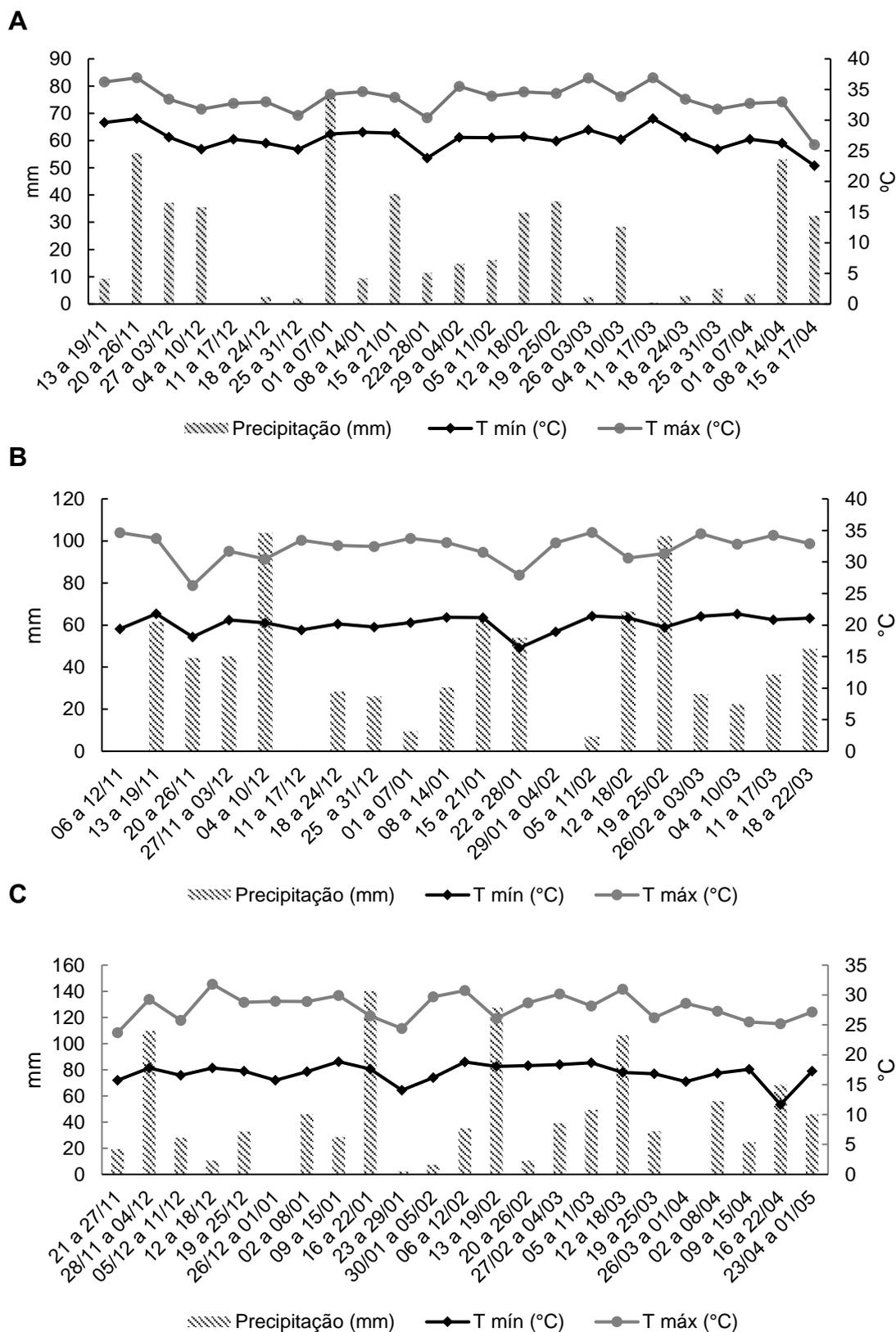


Figura 2 - Climograma durante o período do experimento em Dourados, MS (A , estação climatológica da Embrapa Agropecuária Oeste (CPAO), Londrina, PR (B, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Londrina) e Guarapuava, PR (C, estação climatológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Polo Guarapuava). Onde T mín; Temperatura mínima (°C), T max; Temperatura máxima (°C).

4.2 Tratamentos em avaliação

Nos três experimentos, foram avaliados oito tratamentos, sendo que os primeiros quatro são controles: dois controles foram compostos apenas por formulações de adubação de base 75% e 100% de NPK (20-10-10), e os outros dois foram o biofertilizante comercial Biomaphos[®] sob inoculação via tratamento de semente (TS) e via sulco de plantio (SP). Os demais tratamentos foram compostos por doses de *Bacillus velezensis*, para a cultura do milho, fornecidos pela BioInput[®], empresa parceira da BRANDT[®], sendo reproduzidos com inoculação no sulco e inoculação na semente (Tabela 2).

Tabela 2 - Tratamentos em avaliação utilizados nos campos experimentais em Dourados, MS, Londrina, PR e Guarapuava, PR, na safra 2023/2024.

Trat.	Produtos	AB	mL.50Kg ⁻¹	mL.ha ⁻¹	Inoculação	Adubação
C75	Controle	-	-	-	-	75%
C100	Controle	-	-	-	-	100%
BpS	Biomaphos [®]	<i>B. subtilis</i> e <i>B. megaterium</i>	100	-	TS	75%
BpP	Biomaphos [®]	<i>B. subtilis</i> e <i>B. megaterium</i>	-	200	SP	75%
AP5S	AgPhos	<i>B. velezensis</i>	50	-	TS	75%
AP10S	AgPhos	<i>B. velezensis</i>	100	-	TS	75%
AP10P	AgPhos	<i>B. velezensis</i>	-	100	SP	75%
AP20P	AgPhos	<i>B. velezensis</i>	-	200	SP	75%

Trat.: Tratamento, AB; agente biológico, TS; Tratamento de Semente, SP; Tratamento de Sulco do Plantio.

4.3 Delineamento experimental

Para os três experimentos, os oito tratamentos foram repetidos em quatro blocos completos casualizados, totalizando 32 parcelas. Cada parcela foi constituída por oito linhas de 5,0 metros de plantas com 20 sementes (quatro sementes por metro linear) de milho da cultivar PioneerP3310vyhr, um híbrido de ciclo precoce, com grãos amarelo-alaranjado semiduros, utilizado para produção de grãos e silagem, possuindo 2,59 m de altura com a primeira inserção da espiga a 1,37 m. Foi considerado como área útil os três metros centrais das 4 linhas do meio de cada parcela. O espaçamento entre as linhas das parcelas foi de 0,45 m. Já o espaçamento entre parcelas foi de 0,90m. O

total da área experimental em Dourados e Guarapuava foi de 35 x 27,90 m e de Londrina foi de 48 x 17,1 m (Figura 3).

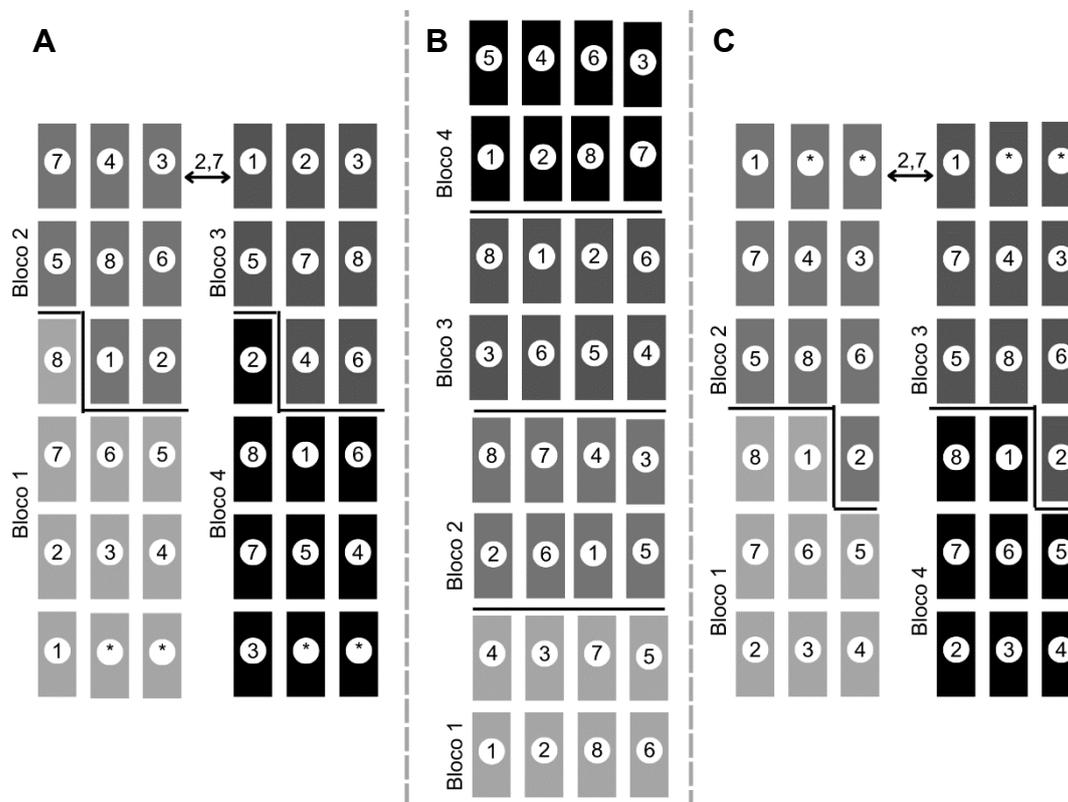


Figura 3 - Croqui experimental do experimento instalado em Dourados, MS (A), Londrina, PR (B) e Guarapuava, PR (C).

Antes do plantio, em Dourados e Londrina foi realizado o preparo mecanizado da área, enquanto em Guarapuava o sistema adotado foi de plantio direto. A adubação foi mecanizada e realizada utilizando fórmula NPK 20-10-10 em dose de 300 kg.ha⁻¹. Em Dourados, MS, o plantio foi realizado entre os dias 13 e 14 de novembro de 2023 e a colheita realizada no dia 11 de abril de 2024. Já em Londrina, PR, o plantio foi realizado no dia 06 de novembro de 2023 e a colheita realizada no dia 23 de março de 2024. Por fim, em Guarapuava, PR, o plantio foi feito no dia 11 de novembro de 2023 e a colheita foi realizada no dia 01 de maio de 2024. Nos três ambientes, as adubações de cobertura foram realizadas quando a cultura alcançou o estágio V6, utilizando ureia na concentração de 300Kg.ha⁻¹ de ureia. O manejo fitossanitário de cada ambiente foi realizado de acordo com as recomendações da região, com aplicação de fungicida e herbicida quando necessário.

4.4 Características avaliadas

Em campo e nos laboratórios de cada Unidade de Ensino superior, foram avaliadas as seguintes características:

- a. Massa de 100 grãos (M100): pesagem em gramas de 100 grãos de cada parcela utilizando balança semi analítica e correção de umidade a 13%.
- b. Produtividade (PROD): peso de grãos da parcela corrigido para estandes pela metodologia da covariância ideal (SCHMILDT et al., 2001) e umidade a 13%, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Produção} = \text{peso fresco da parcela} * \frac{(100-UMp)}{(100-UMd)}, \text{ onde:}$$

UMp: umidade da parcela,

UMd: umidade desejada.

4.4.1 Determinação de fósforo pelo método de digestão ácida

Foram pesados 0,5 g de material vegetal seco e triturado de cada parcela. Então, foram adicionados 5 mL de ácido nitroperclórico (na proporção 4:1) a cada amostra. O material foi mantido em pré-digestão por aproximadamente 12 horas e, em seguida, levado ao bloco digestor. A digestão foi iniciada a uma temperatura inicial de 60 °C e depois aumentada para 120 °C. Neste ponto, a temperatura foi aumentada gradualmente em 30 °C a cada meia hora até atingir 210 °C. Após meia hora a 210 °C, as amostras foram retiradas do bloco digestor.

Depois da digestão, as amostras foram diluídas para um volume de 25 mL com água destilada, logo, o material foi agitado em vórtex para garantir a completa remoção do material do tubo, o homogeneizado foi armazenado em tubos do tipo Falcon até quantificação.

Para a determinação do fósforo foram utilizados volumes de 200 dos homogeneizados. Foi adicionado água destilada até completar 5 mL. Em seguida, foram adicionados 100 µL de ácido ascórbico e 10 mL de solução STM. Após a adição de todos os reagentes, as amostras foram deixadas em descanso por 30 minutos. Após esse período, uma alíquota da amostra foi retirada para leitura a 660 nanômetros em um espectrofotômetro. Os dados obtidos foram

convertidos utilizando uma curva padrão, levando em conta a diluição das amostras.

No Laboratório de Ecofisiologia e Biotecnologia Agrícola da Universidade Estadual de Londrina (UEL), para os grãos colhidos em cada experimento tomando três plantas aleatórias de cada parcela, foram determinados os componentes da eficiência de uso de P pelo método de digestão ácida (MOLL; KAMPRATH; JACKSON, 1982):

- a. Eficiência na aquisição de fósforo (EAP): razão entre o fósforo total da planta (quantificado pelo método de digestão ácida) (g) e a quantidade de P disponível (g).
- b. Eficiência na utilização de fósforo (EUtP): razão entre biomassa seca dos grãos da planta (g) e a quantidade de P total da planta (g), tomando três plantas aleatórias de cada parcela.
- c. Eficiência no uso de fósforo (EU_sP): (g de grãos produzidos por g de P aplicado) produto de EAP e EUtP.

4.5 Análises estatísticas

Inicialmente, as análises estatísticas para obtenção dos resultados foram realizadas de forma individualizada para os dados obtidos de cada experimento. A análise de variância foi realizada de acordo com o modelo estatístico proposto por FISHER, 1934: $Y_{ij} = \mu + g_i + b_j + \varepsilon_{ij}$, em que:

Y_{ij} : valor da característica do i-ésimo tratamento no j-ésimo bloco;

μ : média geral do ensaio;

g_i : efeito do i-ésimo tratamento ($i = 1, 2, \dots, g$);

b_j : efeito do j-ésimo bloco ($j = 1, 2, \dots, r$); e

ε_{ij} : erro aleatório associado ao tratamento i e ao bloco j $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

As médias dos tratamentos de todas as variáveis foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (TUKEY, 1949).

Posteriormente foi realizada uma análise conjunta, em fatorial, incluindo os três ambientes (fator A, como aleatório) e os oito tratamentos (fator T, como fixo), com a homogeneização dos graus de liberdade quando o quadrado médio

do erro foi maior ou igual a 7. A análise seguiu o modelo estatístico pressuposto por FISHER (1934): $Y_{ijk} = \mu + a_i + t_j + (at)_{ij} + c_k + \varepsilon_{ijk}$, em que:

Y_{ijk} : valor da característica do i-ésimo nível do fator A, do j-ésimo nível do fator B e do k-ésimo bloco;

μ : média geral do ensaio;

a_i : efeito do i-ésimo nível do fator A;

t_j : efeito do j-ésimo nível do fator T;

$(at)_{ij}$: efeito da interação dos fatores A e T sobre i-ésimo e j-ésimo níveis;

c_k : efeito do k-ésimo bloco, e

ε_{ijk} : erro aleatório.

Quando a interação entre os fatores A e T foram significativos a 95% de confiança, foi realizada a partição da interação pelo método proposto por ROBERTSON, 1959.

Além disso, as correlações entre as características foram avaliadas pelo modelo matemático da correlação de Pearson: $r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2] * [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}}$, em

que:

$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})$: produtório médio entre os tratamentos para as variáveis X e Y.

$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$: soma de quadrados entre os tratamentos para a característica X.

$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$: soma de quadrados entre os tratamentos para a característica Y.

A análise multivariada foi realizada de acordo com GONÇALVES; FRITSCHÉ-NETO (2012). Primeiramente foi realizada a padronização dos dados, segundo a equação matemática abaixo:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sigma_j}, \text{ em que:}$$

X_{ij} : valores observados de cada indivíduo i para uma dada variável j

σ_j : desvio padrão da j -ésima variável

Posteriormente, a matriz de correlação de Pearson (R) foi determinada conforme equação elucidada acima. A partir disso os autovalores (λ_j) e autovetores (α_j) foram estimados por meio de:

$\det(R - \lambda I) = 0$ e $(R - \lambda_j I) * \alpha_j = \Phi$, respectivamente, em que:

I : matriz identidade, de dimensão ($p \times p$)

R : matriz de correlações entre pares de variáveis originais de dimensão ($p \times p$)

Φ : vetor nulo, de dimensão ($p \times 1$) e diferente de α_j

Por fim, a estimativa dos componentes principais é dada por:

$Y_{n,ij} = Z_{ij} * \alpha_j$, onde:

$Y_{n,ij}$: Componente principal n , de cada indivíduo i para uma dada variável j .

As análises de variâncias individuais e conjunta e o teste de comparação de médias individuais e conjunta foram realizadas no programa GENES (CRUZ, 2013). Os gráficos dos testes de comparação de médias individuais foram feitos pelo software Graph Pad Prism (GraphPad Software, San Diego, CA, USA). Já a correlação de Pearson e o teste de Lilliefors e a análise multivariada foram realizadas no programa R, utilizando os pacotes “ggcorrplot” e “MultivariateAnalysis”, respectivamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de variância

A partir da análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 3, foi constatado que no ambiente de Dourados houve diferença significativa para a fonte de variação tratamentos a 1% de probabilidade pelo teste F para a característica EAP, e significativo a 5% de probabilidade para a característica EUsP. Esses resultados indicam que pelo menos um tratamento difere dos demais para as duas variáveis, demonstrando variabilidade de resposta das plantas de milho em relação aos tratamentos. Já para as variáveis M1000, EUtP e Prod não foi constatado diferença significativa entre os tratamentos.

Em relação ao coeficiente de variação experimental (CV), de acordo com PIMENTEL-GOMES (2000), quanto menor o valor maior a precisão do experimento. Considerado baixo quando inferior a 10%, médio entre 10 e 20%, encontrado para as variáveis M1000 e EUtP, alto entre 20 e 30%, encontrado em EUsP, e muito alto quando superiores a 30%, encontrado em EAP e Prod.

Em Londrina, EAP, EUtP e EUsP apresentaram diferença significativa a 1% de probabilidade, enquanto P1000 resultou diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste F. Já Prod não exibiu diferença significativa entre os tratamentos. Ademais, o CV encontrado para P1000 é classificado como baixo, EAP, EUtP, EUsP e Prod apresentaram coeficientes de variação médios.

Por fim, em Guarapuava, EAP e EUsP apresentaram diferença significativa a 5% de probabilidade, enquanto que para P1000, EUtP e Prod os tratamentos não foram significativamente diferentes, não havendo alteração da resposta das plantas de milho para estas características conforme as diferentes inoculações. Ademais a variável P1000 apresentou CV baixo, Prod apresentou CV médio e EAP, EUtP e EUsP são classificados como coeficientes altos.

Logo, é possível perceber o experimento conduzido em Londrina apresentou maior precisão experimental, uma vez que os valores dos coeficientes de variação foram menores. Em seguida, o experimento instalado em Guarapuava pode ser considerado com precisão intermediária, uma vez que apresentou CVs menores que o experimento conduzido em Dourados, que por

sua vez, apresentou menor precisão experimental quando comparado aos outros dois locais.

Tabela 3 - Estimativas dos quadrados médios, médias e coeficientes de variação de cinco caracteres de produção e de eficiência do uso de fósforo avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024. Londrina, PR, março/2024. Guarapuava, PR, maio/2024

Variável	FV	GL	Quadrados médios		
			Dourados	Londrina	Guarapuava
P1000	Trat	7	699,982 ^{ns}	1.184,000*	151,307 ^{ns}
	Bloco	3	413,708	697,250	70,274
	Erro	21	641,708	394,964	183,592
	CV (%)	-	10,957	6,967	8,537
	Média	-	231,187	285,25	158,709
EAP	Trat	7	0,045**	0,072**	0,471*
	Bloco	3	0,044	0,027	0,141
	Erro	21	0,017	0,007	0,400
	CV (%)	-	30,750	12,382	21,377
	Média	-	0,425	0,658	0,646
EUtP	Trat	7	972,469 ^{ns}	2.168,151**	7.535,451 ^{ns}
	Bloco	3	3.807,553	975,384	20.336,463
	Erro	21	1359,664	519,349	5.464,897
	CV (%)	-	13,990	10,883	21,557
	Média	-	263,572	209,393	342,925
EUsP	Trat	7	2.410,757*	2.907,625**	5.747,639*
	Bloco	3	2260,051	688,498	439,364
	Erro	21	964,017	411,634	2.100,007
	CV (%)	-	28,029	14,898	21,373
	Média	-	110,773	136,181	214,406
Prod	Trat	7	170.447 ^{ns}	769.077 ^{ns}	6.949.358 ^{ns}
	Bloco	3	8.4630	1.361.068	749.940
	Erro	21	224.032	1.333.023	3.495.631
	CV (%)	-	39,175	13,995	19,511
	Média	-	1.208,215	8.249,515	9.582,799

Peso de 1.000 grãos (P1000); Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP); Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP); Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod); Coeficiente de variação (CV); **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente.

5.2 Teste de média das características avaliadas

5.2.1 Dourados

O teste de Tukey a 95% de confiança confirmou as premissas resultantes da ANOVA para o experimento conduzido em Dourados (Figura 4). O tratamento que apresentou maior peso de 1.000 sementes (P1000) foi o AP10P (248 g)

sendo estatisticamente igual ao tratamento com menor peso (tratamento AP5S com média 211,75 g).

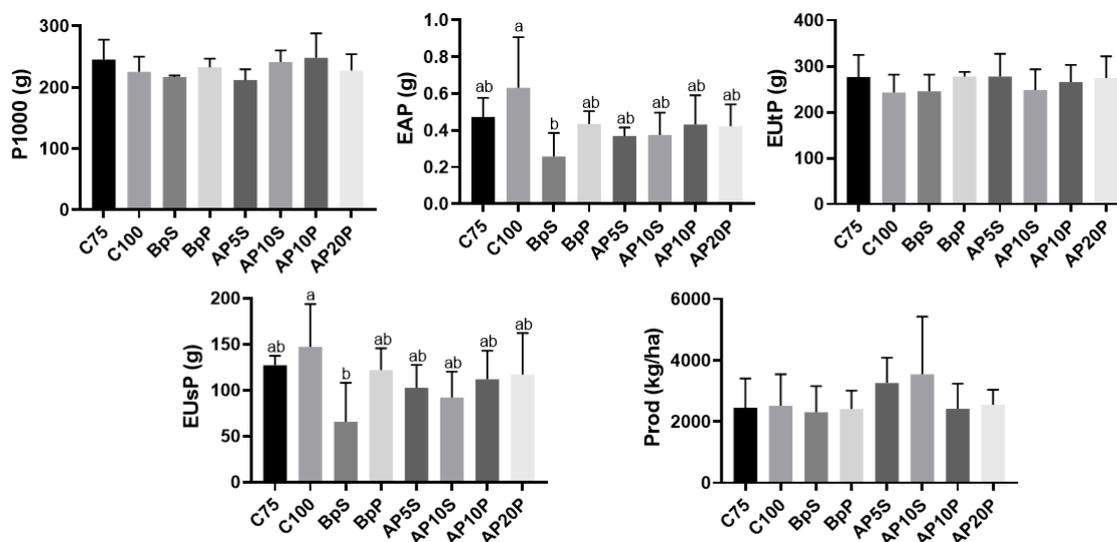


Figura 4 - Médias da peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUSP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As variáveis que explicam a translocação do P pela planta, são: eficiência de aquisição de P (EAP), que se refere à capacidade das culturas de absorver P dos solos, e a eficiência no uso de fósforo (EUSP) que é a capacidade de produção de biomassa ou rendimento usando o P adquirido. O aumento da eficiência de P nas plantas pode ser alcançado por meio da melhoria da aquisição e/ou utilização de P, propiciando a redução do uso de fertilizantes químicos (NETTO PARENTONI; LOPES DE SOUZA JÚNIOR, 2008; SHENOY; KALAGUDI, 2005, MANSKE et al., 2001; WANG; SHEN; LIAO, 2010).

Em Dourados, o tratamento que promoveu a maior EAP pelas plantas de milho foi o controle C100 (0,633 g), sendo que os controles C75 (0,473 g), BpP (0,435 g) e as doses AgPhos AP5S (0,370 g), AP10S (0,375 g), AP10P (0,433 g) e AP20P (0,423 g) foram estatisticamente iguais a este controle (100% de adubação). Ademais, esses mesmos tratamentos (C75, BpP, AP5S, AP10S, AP10P e AP20P) também foram estatisticamente iguais ao controle BpS (0,258 g), que apresentou a menor média para EAP. Assim, as parcelas adubadas com apenas 75% da dose convencional de NPK (controle C75) tiveram média de EAP igual as parcelas com adubação completa (controle C100), ou seja, embora uma

redução significativa da dose, não houve alteração da eficiência de aquisição de fósforo pelas plantas de milho.

Todos os tratamentos tiveram o mesmo desempenho para a variável eficiência da utilização de fósforo, portanto a quantidade de fósforo armazenado nos grãos das plantas inoculadas com Biomaphos® no sulco de plantio (controle BpP com maior média, 277,87 g) foi estatisticamente igual à quantidade de fósforo armazenado pelas plantas apenas adubadas com 100% (controle C100 com menor média, 242,84 g).

Para a característica EUsP o mesmo comportamento de comparação das médias da variável EAP foi observado, portanto o tratamento que promoveu o maior uso de fósforo pelas plantas de milho foi o controle C100 (147,29 g), sendo que os controles C75 (127,23 g) e BpP (121,95 g) e os tratamentos AP5S (102,77 g), AP10S (92,02 g), AP10P (112,07 g) e AP20P (117,16 g) foram estatisticamente iguais a este controle (100% de adubação). Ademais, esses mesmos tratamentos (C75, BpP, AP5S, AP10S, AP10P e AP20P) também foram estatisticamente iguais ao controle BpS (65,70 g), que apresentou a menor média para EUsP. Esse comportamento semelhante no agrupamento de médias sugere que as variáveis EUsP e EAP são correlacionáveis.

Por fim, as plantas submetidas aos oito tratamentos não apresentaram produção estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Assim o tratamento AP10S, que propiciou a maior produção das plantas (3.550,65 Kg/ha) foi estatisticamente igual ao controle BpS, que proporcionou a menor média (2.306,99 Kg/ha). Como estudos com inoculantes são pouco comuns no centro-oeste do Brasil, não foram encontrados registros do desempenho de nenhum dos controles nas condições ambientais do Mato Grosso do Sul.

5.2.2 Londrina

O teste de Tukey a 5% de probabilidade para as variáveis do experimento conduzido em Londrina está descrito na Figura 5. Para a variável P1000, o tratamento que apresentou a maior média foi o controle C100 (313,50 g) e o que apresentou menor média foi o controle BpP (261,00 g), sendo que os controles C75 (299,25 g) e BpS (291,00 g) e as doses AgPhos AP5S (280,00 g), AP10S

(292,25 g), AP10P (277,75 g) e AP20P (267,25 g) foram estatisticamente iguais aos controles C100 e BpP.

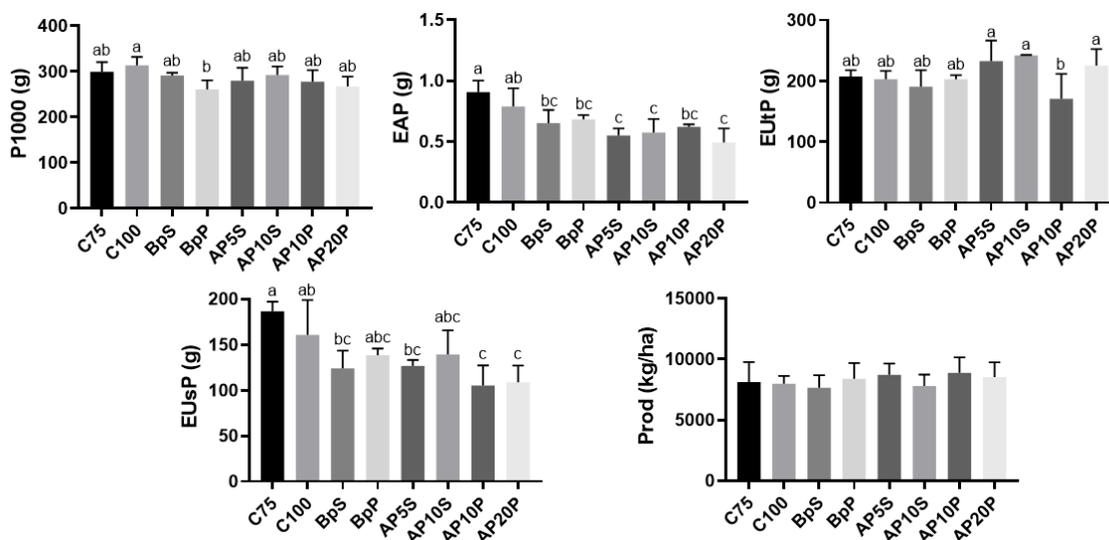


Figura 5 - Médias do peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUSP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Londrina, PR, março/2024. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a variável EAP, o controle C75 apresentou a maior média (0,907 g), e os tratamentos AP5S (0,550 g), AP10S (0,575 g) e AP20P (0,492 g) apresentaram as menores eficiências de aquisição de fósforo. O controle C100 (0,787 g) apresentou média igual ao controle C75, BpS (0,652 g) e BpP (0,682 g) e ao tratamento AP10P (620 g), estes três últimos, tiveram suas médias iguais entre si e iguais ao controle C100, e aos tratamentos AP5S, AP10S e AP20P. Um experimento conduzido em Londrina na safra de 2020/2021, com outra variedade de milho, apresentou média de EAP de 0,92 g quando suas sementes foram inoculadas com Biomaphos® (MASSUCATO et al., 2022) e assumiu uma posição intermediário no teste de Tukey a 5% de probabilidade, um valor superior ao encontrado no presente estudo (controle BpS), todavia a classificação do controle BpS também foi intermediária pelo mesmo teste.

Quanto a eficiência na utilização de fósforo, as maiores médias pertenceram aos tratamentos AP5S (232,74 g), AP10S (242,09 g) e AP20P (225,52 g), estes sendo iguais entre si e diferentes dos demais. O tratamento com a menor média foi o AP10P (170,88 g), e os controles C75 (207,51 g), C100 (202,87 g), BpS (190,78 g) e BpP (202,74 g) foram estatisticamente iguais entre

si e aos tratamentos AP5S, AP10S, AP10P e AP20P. No estudo de MASSUCATO et al. (2022), as plantas tratadas com Biomaphos® tiveram média de 489 g, sendo novamente superior à média encontrada no presente estudo (190,78 g).

O tratamento que apresentou a maior eficiência no uso de fósforo foi o controle C75 (186,34 g), e os que apresentaram menor eficiência foram os tratamentos AP10P (105,08 g) e AP20P (108,82 g), o controle C100 (160,81 g) foi estatisticamente igual aos controles C75, BpS (124,02 g) e BpP (138,46 g) e aos tratamentos AP5S (126,78 g) e AP10S (139,13 g). O controle BpS e o tratamento AP5S foram iguais entre si, e estatisticamente iguais ao controle C100 e tratamentos BpP, AP10S, AP10P e AP20P, por fim, o controle BpP e o tratamento AP10S foram estatisticamente iguais entre si e a todos os outros tratamentos (C75, C100, BpS, AP5S, AP10P e AP20P). Observa-se que os tratamentos que apresentaram as maiores médias para EAP e EUsP, também apresentaram as menores EUp, esse comportamento também ocorreu no trabalho de MASSUCATO et al. (2022).

Por fim, não houve diferença estatística entre os oito tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável produção, portando, o tratamento AP10P, que proporcionou a maior média (8.865 Kg.ha⁻¹), foi estatisticamente igual ao controle BpS (7.979 Kg.ha⁻¹), que propiciou a menor produção.

5.2.3 Guarapuava

Para o experimento conduzido em Guarapuava, o teste de Tukey a 95% de confiança está descrito na Figura 6. O tratamento AP5S (168,60 g) provocou o maior peso de 1.000 grãos (P1000), sendo estatisticamente igual ao tratamento BpP (156,85 g), que proporcionou menor peso.

O tratamento que promoveu a maior EAP pelas plantas de milho foi a dose AgPhos AP5S (0,899 g), já os tratamentos com menores médias foram os controles C75 (0,552 g) e BpS (0,552), sendo estatisticamente iguais entre si. As médias intermediárias foram registradas pelos controles C100 (0,593 g) e BpP (0,626 g) e pelos tratamentos AP10S (0,647 g), AP10P (0,632 g) e AP20P (0,748 g), estes foram iguais aos tratamentos de maior (AP5S) e menor média (C75 e BpS). Assim, as sementes inoculadas com 50 mL. 50Kg⁻¹ da bactéria *B.*

velezensis tiveram média de EAP superior a todos os outros tratamentos, logo, a inoculação foi efetiva e desempenhou aumento na disponibilização de fósforo para plantas de milho durante a safra 23/24 de Guarapuava.

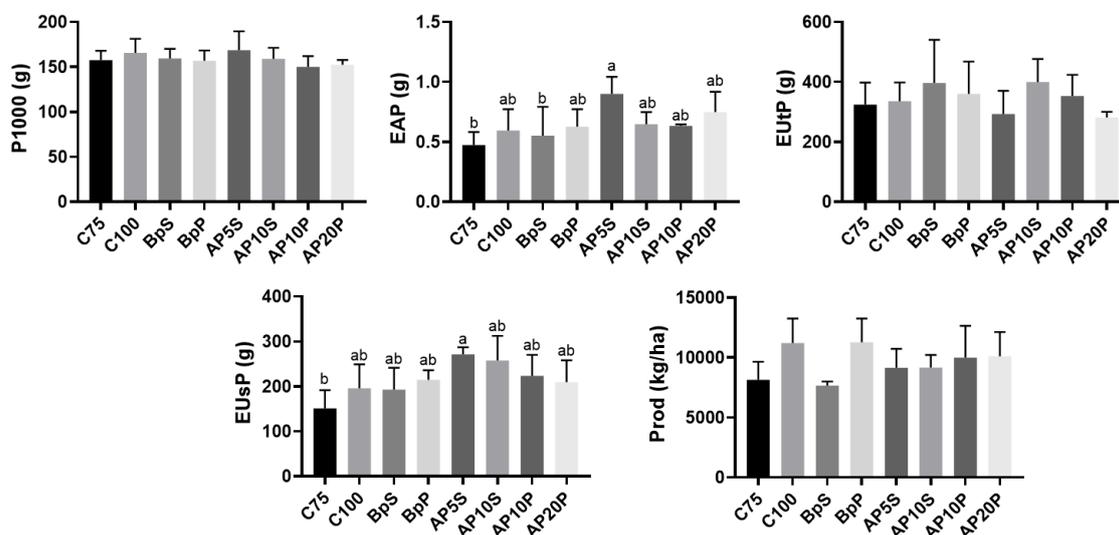


Figura 6 - Médias da peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUTP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUSP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Guarapuava, PR, Maio/2024. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Como ocorreu em Dourados, em Guarapuava todos os 8 tratamentos apresentaram o mesmo desempenho para a variável eficiência da utilização de fósforo, portanto a quantidade de fósforo armazenado nos grãos das plantas inoculadas com 100 mL. 50Kg⁻¹ de *B. velezensis* (tratamento AP10S com maior média, 399,75 g) foi estatisticamente igual à quantidade de fósforo armazenado pelas plantas inoculadas com 200 mL.ha⁻¹ da mesma bactéria (tratamento AP20P com menor média, 281,25 g).

Para a característica EUSP o mesmo comportamento de agrupamento de média da variável EAP foi observado, portanto, o tratamento que promoveu o maior uso de fósforo pelas plantas de milho foi o AP5S (271,25 g), e o que promoveu a menor EUSP foi o controle C75 (150,75 g). Os controles C100 (195,50 g), BpS (193,00 g) e BpP (214,50 g) e os tratamentos AP10S (257,50 g), AP10P (223,25 g) e AP20P (209,50 g) foram estatisticamente iguais ao tratamento AP5S e ao controle C75.

Por fim, a produção dos 8 tratamentos foi estatisticamente igual pelo teste de Tukey a 95% de confiança. Assim o controle C100, que proporcionou a maior

produção (11.211 Kg/ha) foi estatisticamente igual ao controle BpS, que propiciou a menor média (7.651 Kg/ha).

Cabe aqui ressaltar, que as médias encontradas no presente estudo para as variáveis EAP e EUsP das plantas inoculadas com Biomaphos® (controle BpS), foram menores que as encontradas no estudo de MASSUCATO et al., (2022), que também foi realizado em Guarapuava, mas utilizando outro híbrido de milho.

Assim, para os experimentos conduzidos em Dourados e em Londrina, os tratamentos com as novas doses AgPhos tiveram eficiência semelhante ao controle de menor adubação (75%), para as variáveis avaliadas no presente estudo.

Já, para o experimento conduzido em Guarapuava, essas novas doses foram efetivas para as variáveis em estudo, destacando o tratamento AP5S (50 mL. 50Kg⁻¹ da bactéria *B. velezensis*), que apresentou médias superiores aos controles e as demais doses para EAP e EUsP, indicando a possibilidade de redução do P aplicado no milho. Essa redução tem grande relevância para a agricultura do Paraná e brasileira devido à alta dependência do país de fertilizantes importados e ao aumento dos custos dos fertilizantes fosfatados nos últimos anos (WITHERS et al., 2018). Além de todos os danos ambientais ocasionados pela exploração de fosfato de rocha para produção de fertilizantes químicos (SHARMA et al., 2013).

5.3 Teste de normalidade e correlações entre caracteres

A partir do teste de normalidade de Lilliefors foi constatado que todas as variáveis em todos os três ambientes seguiram a curva de distribuição normal (diagonal principal da Figura 7). Logo, a partir do teste as características P1000, EAP, EUtP, EUsP e Prod avaliadas no experimento conduzido em Dourados (Figura 7 A) apresentaram os seguintes valores calculados: 0,1249; 0,1212; 0,1561; 0,1069 e 0,0773 respectivamente, sendo menores que o valor crítico a 1% de probabilidade (0,1823). Assim, assume-se que é razoável estudar os dados por meio da distribuição normal (hipótese nula), o mesmo comportamento foi observado nos outros dois municípios. Para o experimento conduzido em Londrina (Figura 7 B), os seguintes valores, perante o mesmo teste, foram

obtidos: 0,1412; 0,1642; 0,1359; 0,1809 e 0,1268, respectivamente. Por fim, os valores obtidos para as mesmas variáveis no experimento conduzido em Guarapuava (Figura 7 C) foram: 0,0729; 0,0808; 0,0950; 0,1329 e 0,1426, respectivamente.

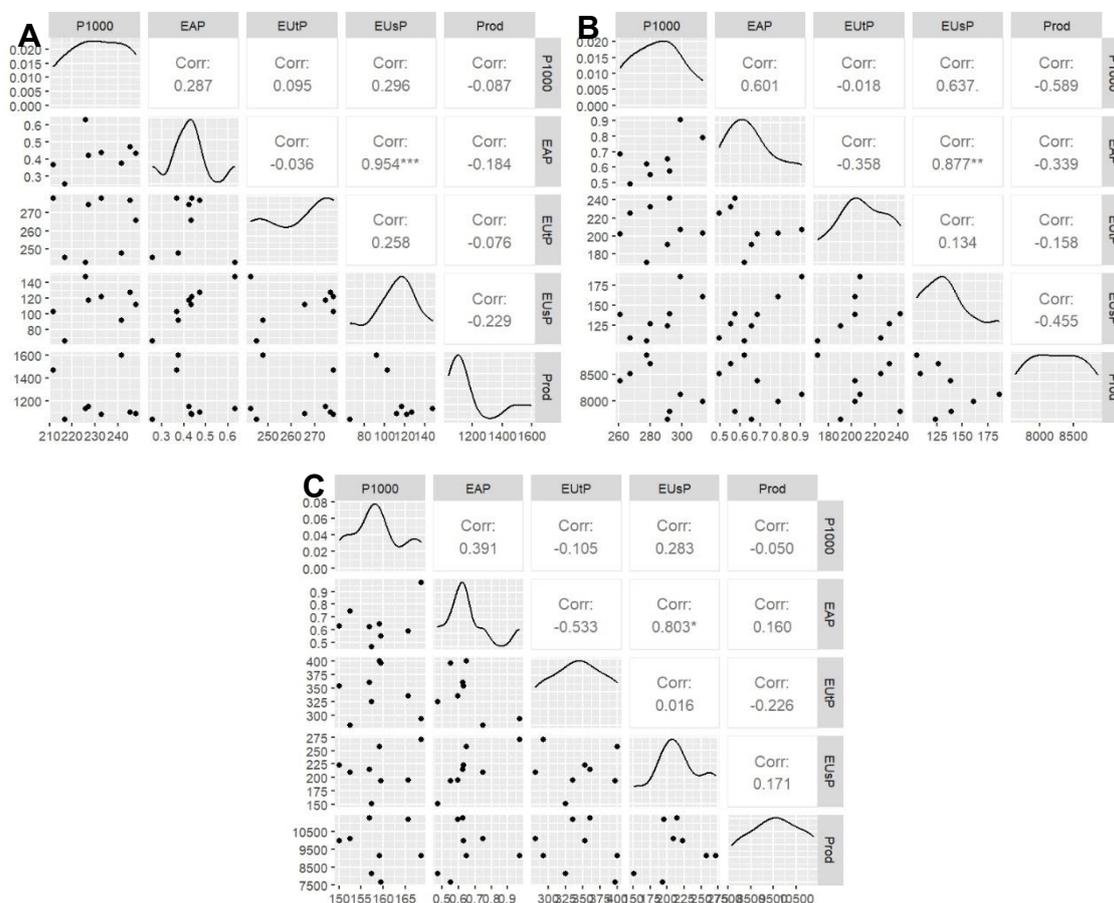


Figura 7 - Coeficientes de correlação fenotípica e teste de normalidade das características peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsp) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B). Guarapuava, PR, maio/2024 (C). ***, **, *, estatisticamente diferente de 0 a 0,1%, 1% e 5% pelo teste T, respectivamente.

Em relação as estimativas de correlação, as únicas variáveis que foram significativamente correlacionadas foram EUsp e EAP, com maior coeficiente para Dourados (0,954), Londrina (0,877) e Guarapuava (0,803), respectivamente. Todos os valores sendo estatisticamente diferentes a zero, pelo teste T a pelo menos 5% de probabilidade, indicando a relação linear positiva entre as duas variáveis. Assim, quanto maior for a eficiência na aquisição de fósforo, maior será a eficiência no uso deste fósforo, ou seja, quanto mais eficiente a planta for em absorver o fósforo, mais fósforo será transferido do solo

ao grão. Essa correlação positiva e significativa entre EUsP e EAP, também foi registrada em estudos de eficiência do uso de fósforo em batata ($r= 0,94-0,97$) (SANDAÑA, 2016), milho ($r=0,86-0,88$) (BAYUELO-JIMÉNEZ; OCHOA-CADAVID, 2014) e milho (GEMENET et al., 2015).

5.4 Análise multivariada

Conforme a análise multivariada, os dois primeiros componentes principais para todos os períodos estudados representaram mais de 60% da variância total acumulada, destacando os dois componentes principais do local de Londrina, que apresentam 80,03% de variância acumulada (Tabela 4). O terceiro componente dos locais não foi incluído na análise por não ter fornecido informações relevantes.

O poder discriminatório das variáveis atribuídas a cada componente principal é mensurado por meio da correlação entre cada variável e o respectivo componente principal (GONÇALVES; FRITSCHÉ-NETO, 2012). Assim, as variáveis com maior poder discriminatório para o primeiro componente principal do experimento conduzido em Dourados foram: EUsP (-0,963), EAP (-0,921) e P1000 (-0,497). As variáveis mais correlacionadas com o componente dois foram: EUtP (-0,927), EAP (0,329) e Prod (0,232) (Tabela 4).

No experimento conduzido em Londrina, as variáveis com maior correlação com o componente principal 1 foram: EUsP (-0,907), EAP (-0,877) e P1000 (-0,848). Já, para o segundo componente, as variáveis com maior poder discriminatório foram: EUtP (-0,943), Prod (0,406) e EAP (0,402). As variáveis: EAP (-0,966), EUsP (-0,798) e P1000 (-0,528) foram as que apresentaram maior correlação com o primeiro componente principal do local de Guarapuava. Por sua vez, as variáveis: Prod (0,674), EUtP (-0,615) e P1000 (-0,466) demonstraram maior poder discriminatório para o segundo componente principal do mesmo local (Tabela 4).

Tanto EUsP quanto EAP estiveram presentes como as variáveis com maior poder discriminatório nos primeiros componentes principais de todas os locais. Provavelmente, devido as duas características possuírem valores de F significativos e serem correlacionáveis entre si (Tabela 3 e Figura 7). Logo, espera-se que quando EAP apresentar elevada correlação com algum

componente principal, a variável EUsP também estará correlacionada ao respectivo componente.

Tabela 4 - Correlação entre cada componente principal e peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações.

Local	CP	Contribuição	Contribuição acumulada	Variáveis				
				P1000	EAP	EUtP	EUsP	Prod
A	1	44,348	44,348	-0,497	-0,921	-0,228	-0,963	0,371
	2	20,560	64,908	-0,071	0,329	-0,927	0,040	0,232
B	1	55,477	55,477	-0,848	-0,877	0,057	-0,907	0,677
	2	24,554	80,031	-0,088	0,402	-0,943	-0,063	0,406
C	1	44,297	44,297	-0,528	-0,966	0,517	-0,798	-0,315
	2	23,055	67,352	-0,466	-0,028	-0,615	-0,321	0,674

Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B). Guarapuava, PR, maio/2024 (C). Componente principal (CP), Contribuição e Contribuição acumulada em %.

Na Figura 8 A, observa-se a formação de diferentes grupos. Os tratamentos AP10P, AP20P, C75, BpP e AP5S apresentaram as maiores médias para a variável EUtP, sendo que, o tratamento AP5S (50mL.50Kg⁻¹ de *B. velezensis*, produto AgPhos) destacou-se dos demais por apresentar a maior produção. Os tratamentos AP10P e C75 tiveram os maiores pesos de 1.000 grãos em comparação com todos os outros tratamentos. O tratamento AP10S destacou-se por sua elevada produção, mas apresentou médias mais baixas para as variáveis de eficiência metabólica de fósforo, situando-se à parte dos demais.

No canto superior esquerdo posiciona-se o controle C100, este exibiu as maiores médias para EAP e EUsP, além de médias intermediárias para produção e P1000, e a menor média para EUtP em comparação aos demais tratamentos, justificando sua posição. Por fim, o tratamento BpS apresentou as menores médias em todas as variáveis ou, quando não foi a menor, possuiu a segunda menor, por não se destacar em nenhuma variável, posicionou-se próximo ao eixo do componente principal 1 (Figura 8 A).

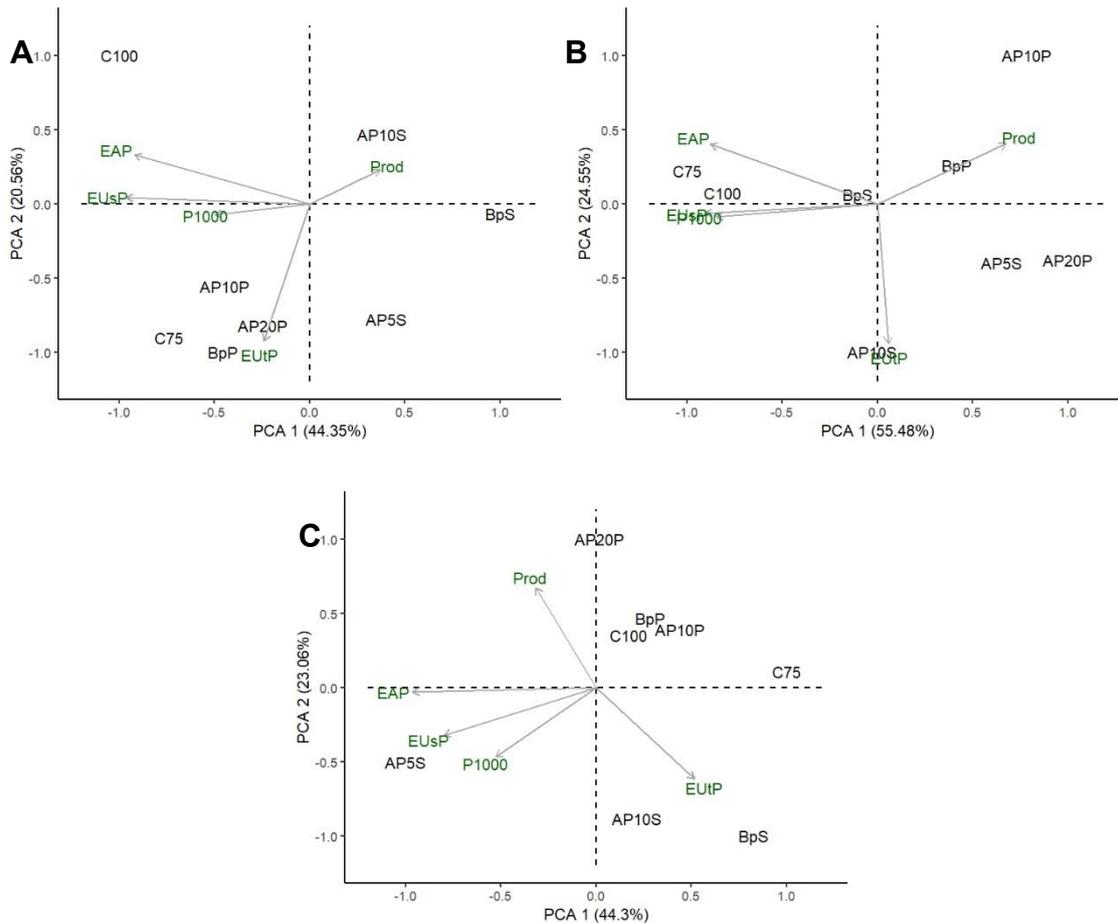


Figura 8 - Dispersão gráfica em relação aos dois primeiros componentes principais (CPA), com base em variáveis de produção e eficiência do metabolismo de fósforo de plantas de milho sob diferentes adubações, inoculações e locais, de acordo com as variáveis: peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod). Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B). Guarapuava, PR, maio/2024 (C). Componente principal (PCA).

No canto superior esquerdo posiciona-se o controle C100, este exibiu as maiores médias para EAP e EUsP, além de médias intermediárias para produção e P1000, e a menor média para EUtP em comparação aos demais tratamentos, justificando sua posição. Por fim, o tratamento BpS apresentou as menores médias em todas as variáveis ou, quando não foi a menor, possuiu a segunda menor, por não se destacar em nenhuma variável, posicionou-se próximo ao eixo do componente principal 1 (Figura 8 A).

A dispersão gráfica dos componentes principais para o local de Londrina (Figura 8 B) demonstrou um rearranjo dos tratamentos completamente distinto do encontrado em Dourados. Uma vez que, o tratamento que apresentou a maior média para a variável EUtP foi o tratamento AP10S, enquanto as maiores médias para EAP, EUsP e P1000 foram observadas nos tratamentos C75 e C100. O

tratamento AP10P destacou-se por sua elevada produção, embora tenha registrado médias mais baixas para as variáveis de eficiência metabólica de fósforo e P1000, posicionando-se no canto superior direito do gráfico.

Os tratamentos AP5S e AP20P também apresentaram elevada produção e EUTP, contudo, o tratamento AP5S exibiu médias superiores ao AP20P, que, devido a menores médias para EAP, P1000 e EUSP, posicionou-se mais à esquerda do gráfico, com produção inferior ao tratamento AP5S. O tratamento BpS, localizado no centro de ambos os eixos, apresentou valores médios para todas as variáveis. Por fim, o tratamento BpP também apresentou médias intermediárias para todas as variáveis de eficiência metabólica de fósforo, mas destacou-se como o terceiro mais produtivo, aproximando-se da seta que indica produção (Figura 8 B).

Por fim, observando o gráfico de dispersão dos dados de Guarapuava (Figura 8 C), percebe-se uma maior rotação das variáveis e, novamente, um rearranjo dos tratamentos que difere daqueles encontrados em Dourados e em Londrina. Os tratamentos com maior EUTP foram o AP10S e BpS, com o tratamento AP10S apresentando produção superior ao tratamento BpS. O tratamento AP5S registrou as maiores médias para EAP, EUSP e P1000, e média intermediária para EUTP e produção.

Por outro lado, o tratamento C75 apresentou as menores médias em todas as variáveis ou, quando não foi a menor, possuiu a terceira menor, por não se destacar em nenhuma variável, posicionou-se próximo ao eixo do componente principal 1. Os tratamentos C100, BpP, AP20P e AP10P apresentaram as maiores produções, respectivamente, o tratamento AP20P, devido à menor média para EUTP, posicionou-se o mais distante possível da coordenada correspondente a essa variável. Os demais tratamentos (C100, BpP e AP10P) exibiram médias intermediárias para todas as outras variáveis, justificando, assim, sua posição mais central no gráfico.

Considerando a expressiva diferença no rearranjo dos tratamentos, e sabendo das diferenças ambientais entre os três locais espera-se variações experimentais significativas, uma vez que, não foi observada uma consistência

nas classificações das médias entre os diferentes locais, o que justifica uma análise da interação tratamentos x ambientes.

No gráfico de dispersão, observa-se a formação de ângulos entre as variáveis, estes indicam a correlação entre duas características, logo, quanto maior a unidade, menor será a correlação presente entre ambas (CHATFIELD; COLLINS, 1980; GONÇALVES; FRITSCHÉ-NETO, 2012; MINGOTI, 2005). Assim, é perceptível, tanto pelo gráfico de dispersão da análise de componentes principais (Figura 8) quanto pelas estimativas de correlação (Figura 7), que as variáveis de eficiência metabólica de fósforo não se relacionam e não explicam a produção. Tal comportamento pode ser explicado pela Lei do Mínimo, segundo a qual o desenvolvimento das plantas é limitado pelo nutriente em menor disponibilidade (HAVLIN et al., 2017), assim, a produção das plantas de milho não foi condicionada pela quantidade de P disponível, uma vez que esse nutriente não foi o limitante. Essa elucidação, também justifica a diferença observada entre os tratamentos quanto às eficiências de absorção e a ausência de variação na produção, uma vez que a eficiência metabólica de P é alterada pelos oito tratamentos, mas essa alteração não foi observada na produção.

5.5 Interação tratamentos x ambientes

A análise de variância conjunta comprovou a pressuposição de que os locais em estudo são diferentes, uma vez que, para todas as características, a fonte de variação ambiente teve valor de F significativo a 99%. Ademais, as variáveis EAP e EUsP apresentaram interação entre tratamentos e ambientes, ou seja, os tratamentos tiveram respostas distintas conforme a alteração do ambiente (Tabela 5).

Quando essa interação entre os ambientes é decomposta tem-se que todos os pares tiveram interação complexa, ou seja, os tratamentos que foram destaque em um determinado ambiente, não apresentaram o mesmo desempenho em outro. Isso provavelmente ocorreu devido a grande diferença ambiental (clima, latitude e solo) entre os ambientes, como descrito anteriormente. Por fim, a diferença entre a classificação dos tratamentos, é muito fácil de ser percebida quando as análises multivariadas são observadas, em que

houve rearranjo completo dos tratamentos que apresentaram as maiores médias para cada ambiente.

Tabela 5 - Resumo da Análise de variância conjunta e porcentagem da parte complexa (Robertson, 1959) resultante da decomposição da interação entre ambientes, de cinco caracteres de produção e de eficiência do uso de fósforo avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações.

FV	Valores de F				
	P1000	EAP	EUTP	EUSP	Prod
Trat.	1,023 ^{ns}	0,516 ^{ns}	0,298 ^{ns}	0,497 ^{ns}	1,029 ^{ns}
Amb.	328,335 ^{**}	39,279 ^{**}	26,350 ^{**}	82,440 ^{**}	227,009 ^{**}
Trat.x Amb.	1,713 ^{ns}	5,220^{**}	1,129 ^{ns}	3,913^{**}	1,063 ^{ns}
Interação complexa					
A x B	-	94,675	-	99,202	-
A x C	-	98,349	-	93,208	-
B x C	-	99,961	-	96,360	-

Peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUTP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUSP) e produção (Prod). Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B). Guarapuava, PR, maio/2024 (C). **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente.

A Tabela 6 demonstra a comparação de cada tratamento entre os diferentes ambientes. Assim, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade, para a variável P1000, houve distinção entre os ambientes para todos os tratamentos. As plantas submetidas aos controles C75 (75% de adubação), C100 (100% de adubação), BpS (100 mL.50Kg⁻¹ de Biomaphos®) e aos tratamentos AP5S (50 mL.50Kg⁻¹ de AgPhos) , AP10S (100 mL.50Kg⁻¹ de AgPhos) e AP20P (200 mL.ha⁻¹ de AgPhos) registraram as maiores médias em Londrina, posterior em Dourados e por último em Guarapuava, sendo os três locais estatisticamente diferentes. Já, as plantas tratadas com o controle BpP (200 mL.ha⁻¹ de Biomaphos®) e AP10P (100 mL.ha⁻¹ de AgPhos) produziram grãos mais pesados em Dourados e Londrina, sendo iguais estatisticamente entre si e diferentes do local de Guarapuava, que apresentou a menor média.

Quanto a Eficiência na Aquisição de Fósforo, poucos tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes, as plantas tratadas com o controle C75 apresentaram a menor EAP em Dourados e Guarapuava, sendo ambas estatisticamente iguais e diferentes de Londrina, que apresentou a maior média. As plantas tratadas com o controle C100 e tratamento AP10P tiveram o mesmo resultado para EAP nos três locais, sendo as três médias estatisticamente iguais.

Já, o controle BpS proporcionou médias maiores e iguais em Londrina e Guarapuava, e menor em Dourados.

Tabela 6 - Peso de 1.000 grãos (P1000), Eficiência na Aquisição de Fósforo (EAP), Eficiência na Utilização de Fósforo (EUtP), Eficiência no Uso de Fósforo (EUsP) e produção (Prod) avaliados em milho sob diferentes adubações e inoculações. Dourados, MS, abril/2024 (A). Londrina, PR, março/2024 (B). Guarapuava, PR, maio/2024 (C).

Variável	Amb.	Tratamentos							
		C75	C100	BpS	BpP	AP5S	AP10S	AP10P	AP20P
P1000	A	245,5B	226,0B	216,8B	232,8A	211,8B	241,5B	248,0A	227,3B
	B	299,3A	313,5A	291,0A	261,0A	280,0A	292,3A	277,8A	267,3A
	C	157,4C	165,6C	159,5C	156,8B	168,6C	159,1C	150,1B	152,5C
EAP	A	0,473B	0,633A	0,258B	0,435B	0,370B	0,375B	0,433A	0,423B
	B	0,908A	0,788A	0,653A	0,683A	0,550B	0,575AB	0,620A	0,493B
	C	0,470B	0,594A	0,552A	0,626AB	0,899A	0,647A	0,632A	0,748A
EUtP	A	276,7AB	242,8B	245,3B	277,9AB	277,7A	248,0B	265,7A	274,4A
	B	207,5B	202,9B	190,8B	202,7B	232,7A	242,1B	170,9B	225,5A
	C	324,4A	335,5A	396,5A	360,0A	293,0A	399,8A	353,0A	281,3A
EUsP	A	127,2B	147,3A	65,7C	122,0B	102,8B	92,0B	112,1B	117,2B
	B	186,3A	160,8A	124,0B	138,5B	126,8B	139,1B	105,1B	108,8B
	C	150,8AB	195,5A	193,0A	214,5A	271,3A	257,5A	223,3A	209,5A
Prod	A	1.103B	1.132C	1.038B	1.086C	1.470B	1.598B	1.090B	1.148B
	B	8.117A	7.979B	7.642A	8.379B	8.708A	7.791A	8.865A	8.513A
	C	8.132A	11.211A	7.651A	11.237A	9.143A	9.156A	9.987A	10.107A

Médias seguidas da mesma letra na coluna da respectiva variável não diferem entre si pelo teste de média de Tukey a 5% de probabilidade.

As plantas submetidas ao controle BpP apresentaram as maiores médias para EAP em Londrina, e as menores em Dourados, sendo ambas estatisticamente diferentes, contudo, Guarapuava, teve média igual a Londrina e Dourados. Os tratamentos AP5S e AP20P possibilitaram maior EAP em Londrina, sendo estatisticamente diferente de Dourados e Guarapuava que apresentaram as menores médias e estatisticamente iguais. Por fim, o tratamento AP10S resultou em um comportamento semelhante ao controle BpP, em que as maiores médias foram registradas em Guarapuava, e as menores em Dourados, sendo ambas estatisticamente diferentes, e Londrina, teve média igual a Guarapuava e Dourados.

As plantas submetidas aos controles C75 e BpP apresentaram maior Eficiência na Utilização de Fósforo maior em Guarapuava e menor em Londrina, sendo estatisticamente diferentes, enquanto isso, Dourados apresentou média igual a ambas. Foi registrado maior média de EUtP em Guarapuava quando as plantas foram submetidas aos controles C100 e BpS e ao tratamento AP10S, sendo estatisticamente diferente das médias de Dourados e Londrina, que

apresentaram as menores, estatisticamente iguais. Não houve diferença na EUtP pelas plantas nos três ambientes, quando submetidas aos tratamentos AP5S e AP20P. O tratamento AP10P promoveu maiores EUtP em Dourados e Guarapuava, sendo estatisticamente iguais entre si e diferentes de Londrina, que apresentou a menor média.

Quanto a variável EUsP, as plantas que receberam o controle C75 apresentaram maior eficiência em Londrina, do que em Dourados, estas sendo estatisticamente diferentes, Guarapuava foi estatisticamente igual a ambas. Não houve diferença entre os locais para o controle C100. As plantas submetidas ao controle BpS apresentaram maiores médias em Guarapuava, em Londrina e em Dourados, respectivamente, sendo as três médias estatisticamente diferentes. Ademais, para o controle BpP e os tratamentos AP5S, AP10S, AP10P e AP20P, Dourados apresentou a menor média, e Londrina e Guarapuava as maiores, sendo estas últimas estatisticamente iguais entre si.

Por fim, as plantas submetidas aos controles C75 e BpS e as doses AgPhos AP5S, AP10S, AP10P e AP20P apresentaram maiores produções em Londrina e Guarapuava, sendo estatisticamente iguais e diferentes da média de Dourados, que foi a menor. Já, os três ambientes foram estatisticamente diferentes quando as plantas foram expostas aos controles C100 e BpP, havendo a formação de três grupos de médias, sendo a maior registrada em Guarapuava, Londrina e Dourados, respectivamente.

Logo, ao analisar as médias gerais dos três ambientes para EUsP, observa-se que Dourados e Londrina apresentam as menores médias, enquanto Guarapuava possui a maior. Tal comportamento deveria ser distinto, pois quando observamos a Tabela 1 e a comparamos com a classe de interpretação de disponibilidade de P descrita por VERGÜTZ; NOVAIS, (2015), percebe-se que Londrina e Dourados apresentam alta disponibilidade de fósforo no solo, e Guarapuava apresenta disponibilidade baixa. Assim, os resultados obtidos no presente estudo não corroboram com a disponibilidade de fósforo de cada área experimental, mas, podem ser explicados pela menor eficiência de absorção e remobilização do nutriente pelas plantas de milho (BAYUELO-JIMÉNEZ; OCHOA-CADAVID, 2014) nos experimentos conduzidos em Dourados e Londrina, quando comparadas ao de Guarapuava.

PUGNAIRE; CHAPIN (1992) e SCHULTHESS; FEIL; JUTZI (1997) destacam que a absorção e remobilização de fósforo são reguladas por diversos fatores ambientais, incluindo disponibilidade de nutrientes, temperatura, disponibilidade hídrica e capacidade de drenagem. Além disso, a remobilização de fósforo dentro da planta ocorre por meio do floema, cuja atividade é influenciada por gradientes de potencial hídrico; conseqüentemente, o estresse hídrico, causado por estiagem e temperaturas elevadas, pode acelerar a senescência das folhas e prejudicar a remobilização de fósforo durante a fase de enchimento dos grãos (PUGNAIRE; CHAPIN, 1992).

A relação entre maior estresse hídrico e menores médias de EAP e EUsP torna-se mais evidente ao se analisar os climogramas dos ambientes. O período que o experimento foi conduzido em Dourados, caracterizou-se por elevadas temperaturas e longos períodos de estiagem, apresentou maior variação térmica diária e menores médias de EAP e EUsP. Londrina mostrou comportamento intermediário, com precipitações bem distribuídas e temperaturas moderadas, mas ainda com variações diárias significativas, logo, possuiu valores de EAP e EUsP também inferiores. Guarapuava, por sua vez, apresentou as menores temperaturas e o maior índice pluviométrico dentre os três locais estudados, apresentando as maiores EAP e EUsP. Além disso, o uso do sistema de plantio direto deste município aumenta umidade retida no solo, diminuindo o estresse hídrico sobre as plantas.

Logo, enfatiza-se a necessidade e importância da condução do mesmo experimento em diferentes locais. Como observado no presente estudo, as doses não foram efetivas para aumento das variáveis em Dourados e Londrina, mas em Guarapuava aumentaram consideravelmente a produção e as variáveis de EUP.

6 CONCLUSÕES

- 1) Verificou-se que, nos experimentos conduzidos em Dourados e Londrina durante a safra 2023/2024, diferentes concentrações de *B. velezensis* não alteraram a resposta das plantas de milho em relação a produção e as variáveis de eficiência no uso de fósforo. Contudo, em Guarapuava, a concentração de 50mL.50Kg⁻¹ de *B. velezensis* apresentou as maiores médias para as variáveis de eficiência do uso de fósforo.
- 2) Ademais, nos experimentos conduzidos em Dourados e Londrina durante a safra 2023/2024, não houve diferença significativa entre os diferentes métodos de inoculação, havendo a mesma resposta das plantas de milho em relação a produção e as variáveis de eficiência no uso de fósforo. Porém, em Guarapuava, o método de tratamento de sementes com *B. velezensis* apresentou as maiores médias para as variáveis de eficiência do uso de fósforo, indicando maior eficiência no uso de fósforo pelas plantas inoculadas com o agente biológico em estudo.
- 3) Os tratamentos não apresentaram comportamento uniforme nos diferentes ambientes de Dourados, MS, Londrina, PR e Guarapuava, PR, sendo explicado pelas mudanças climáticas e diferentes manejos, evidenciando a importância de conduzir experimentos em múltiplas regiões.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZAL, Aftab; BAHADER, Shafaat; HASSAN, Tamoor UI; NAZ, Irum; DIN, Aziz-ud-. Rock Phosphate Solubilization by Plant Growth-Promoting *Bacillus velezensis* and Its Impact on Wheat Growth and Yield. **Geomicrobiology**, v. 40, n. 2, p. 131–142, 2023.

AMARAL, João Alberto Martins Do; MOTCHI, Eliar Pedro; OLIVEIRA, Henrique De; FILHO, Amaury de Carvalho; NAIME, Uebi Jorge; SANTOS, Raphael David Dos. **Levantamento semidetalhado dos solos do campo experimental de Dourados, da Embrapa agropecuária oeste, município de Dourados, MS**. Dourados, MS: Embrapa, 2000. v. 1

ANDERSON, Edgar. **The Sacred Plume: A Description of the Maize Tassel with Some Indications of Its Importance**. Ithaca, NY: Pioneer Hi-Bred Corn Company, 1951.

APROSOJA, Associação dos Produtores de Soja de Mato Grosso do Sul. **Análise do custo de produção da safra 2023 de milho no Mato Grosso do Sul**. 1. ed. Campo Grande, MS: APROSOJA, 2023. v. 1 Disponível em: https://aprosojams.org.br/sites/default/files/boletins/CUSTO%20DE%20PRODU%20C3%87%C3%83O%20-%20MILHO%202023%20%281%29_0.pdf. Acesso em: 26 nov. 2024.

BAVEYE, Philippe C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 637–642, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140819.

BAYISA, Regassa Ayana. *Bacillus velezensis* AR1 mediated plant nourishing through solubilization of hardly soluble phosphorus nutrient sources. **Cogent Food and Agriculture**, v. 9, n. 2, 2023. DOI: 10.1080/23311932.2023.2276561.

BAYUELO-JIMÉNEZ, Jeannette S.; OCHOA-CADAVID, Iván. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. **Field Crops Research**, v. 156, p. 123–134, 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.11.005.

BORÉM, Aluizio; GALVÃO, João Carlos Cardoso; PIMENTEL, Marcos Aurélio. **Milho do plantio à Colheita**. 1. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. v. 1

BYERLEE, Derek. The globalization of hybrid maize, 1921-70. **Journal of Global History**, v. 15, n. 1, p. 101–122, 2015.

CAMPO, Rubens José; ARAUJO, Ricardo Silva; MOSTASSO, Luís; HUNGRIA, Mariangela. In-Furrow inoculation of soybean as alternative to fungicide and micronutrient seed. **Biologia do Solo**, v. 34, p. 1103–1112, 2010.

CHATFIELD, Christopher; COLLINS, Alexander J. **Introduction to Multivariate Analysis**. Bath, UK: Springer US, 1980. DOI: 10.1007/978-1-4899-3184-9.

CHENG, Yingying; NARAYANAN, Mathiyazhagan; SHI, Xiaojun; CHEN, Xinping; LI, Zhenlun; MA, Ying. Phosphate-solubilizing bacteria: Their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity. **Science of the Total Environment**, v. 901, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166468.

CHEN, Pei et al. *Bacillus aerolatus* sp. nov., a novel member of the genus *Bacillus*, isolated from bioaerosols in a school playground. **Archives of Microbiology**, v. 202, n. 9, p. 2373–2378, 2020. DOI: 10.1007/s00203-020-01955-3.

COELHO, Antônio Marcos. **Circular Técnica: Nutrição e Adubação do Milho**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa, 2006. v. 1

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. 1. ed. Brasília, DF. v. 11 Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 26 nov. 2024.

CONTINI, Elisio et al. **Milho - Caracterização e Desafios Tecnológicos**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2019. v. 1

CORDELL, Dana; DRANGERT, Jan Olof; WHITE, Stuart. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.

CRUZ, Cosme Damião. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271–276, 2013. DOI: 10.4025/actasciagron.v35i3.21251.

CRUZ, José Carlos; FILHO, Israel A. Pereira; ALVARENGA, Ramon Costa; NETO, Miguel M. Gontijo; VIANA, João Herbert M.; OLIVEIRA, Maurílio Fernandes De; SANTANA, Derli P. **Circular Técnica: Manejo da Cultura do Milho**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2006. v. 1

CRUZ, José Carlos; MAGALHÃES, Paulo César; FILHO, Israel Alexandre Pereira; MOREIRA, José Aloísio Alves. **Milho: O produtor pergunta, a Embrapa responde**. 1. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2011. v. 1

FISHER, Ronald Aylmer. **Statistical Methods for Research Workers**. 5. ed. London,UK: Oliver and Boyd, 1934. v. 1

GEMENET, Dorcus C.; HASH, C. Tom; SANOGO, Moussa D.; SY, Ousmane; ZANGRE, Roger G.; LEISER, Willmar L.; HAUSSMANN, Bettina I. G. Phosphorus uptake and utilization efficiency in West African pearl millet inbred lines. **Field Crops Research**, v. 171, p. 54–66, 2015. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.11.001.

GOMES, Eliane Aparecida; PAIVA, Christiane Abreu de Oliveira; DIAS, Fernanda Elisa Soares; SANTOS, Flavia Cristina Dos; MARRIEL, Ivanildo Evódio. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Efeito da inoculação de bactérias solubilizadoras de fosfato sobre o crescimento de milho (Pennisetum glaucum) fertilizado com fosfato de rochas**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2011. v. 1

GONÇALVES, Manoel Carlos; FRITSCHÉ-NETO, Roberto. **Tópicos especiais de biometria no melhoramento de plantas**. 631.52 ed. Visconde do Rio Branco, MG: Suprema, 2012. v. 1

HALDAR, Shyamalina; SENGUPTA, Sanghamitra. Plant-microbe Cross-talk in the Rhizosphere: Insight and Biotechnological Potential. **The Open Microbiology Journal**, v. 1, n. 1, p. 1–7, 2015.

HAVLIN, John L.; TISDALE, Samuel L.; NELSON, Werner L.; BEATON, James D. **Soil Fertility and Fertilizers**. 10. ed. Tamil Nadu, India: Pearson, 2017. v. 1. Acesso em: 17 dez. 2024.

IGIEHON, Blessing Chidinma; BABALOLA, Olubukola Oluranti; HASSEN, Ahmed Idris. Rhizosphere competence and applications of plant growth-promoting rhizobacteria in food production – A review. **Scientific African**, v. 23, 2024. DOI: 10.1016/j.sciaf.2024.e02081.

IMASUL, Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul; SEMADE, Secretaria de Estado de Meio Ambientes e Desenvolvimento Econômico. **Geoambientes da Faixa de Fronteira GTNF/MS**. 1. ed. Campo Grande, MS: Governo do Estado de Mato Grosso do Sul, 2016. v. 1

IQBAL, Asif; QIANG, Dong; XIANGRU, Wang; HUIPING, Gui; HENGHENG, Zhang; XILING, Zhang; MEIZHEN, Song. Genotypic Variation in Cotton Genotypes for Low Phosphorus Tolerance and Efficiency Under Different Growth Conditions. **Gesunde Pflanzen**, v. 75, n. 5, p. 1975–1993, 2023. DOI: 10.1007/s10343-022-00823-y.

KHAN, Aimen Razzaq; MUSTAFA, Adeena; HYDER, Sajjad; VALIPOUR, Mohammad; RIZVI, Zarrin Fatima; GONDAL, Amjad Shahzad; YOUSUF, Zubaida; IQBAL, Rashid; DARAZ, Umar. Bacillus spp. as Bioagents: Uses and Application for Sustainable Agriculture. **Biology**, v. 11, n. 12, 2022. DOI: 10.3390/biology11121763.

KIESSELBACH, Theodore A. **Research Bulletin: The Structure and Reproduction of Corn**. 1. ed. Lincoln, NE.

LENNON, Jay T.; JONES, Stuart E. Microbial seed banks: The ecological and evolutionary implications of dormancy. **Nature Reviews Microbiology**, v. 9, n. 2, p. 119–130, 2011. DOI: 10.1038/nrmicro2504.

LOPES, Monyck Jeane dos Santos; SANTIAGO, Beatriz Silva; SILVA, Ila Nayara Bezerra Da; GURGEL, Ely Simone Cajueiro. Biotecnologia microbiana: inoculação, mecanismos de ação e benefícios às plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e356101220585, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i12.20585.

MAGALHÃES, Paulo César; DURÕES, Frederico O. M. **Circular técnica: Fisiologia da Produção de Milho**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2006. v. 1

MALHOTRA, Hina; VANDANA; SHARMA, Sandeep; PANDEY, Renu. Phosphorus nutrition: Plant growth in response to deficiency and excess. *Em: Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*: Springer Singapore, 2018. p. 171–190. DOI: 10.1007/978-981-10-9044-8_7.

MANGELSDORF, Paul C. **Corn: Its Origin, Evolution and Improvement**. 1. ed. Massachusetts: Harvard University Press, 1974. v. 1

MANSKE, G. G. B.; ORTIZ-MONASTERIO, J. I.; VAN GINKEL, M.; GONZÁLEZ, R. M.; FISCHER, R. A.; RAJARAM, S.; VLEK, P. L. G. Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. **European Journal of Agronomy**, v. 14, p. 261–274, 2001. . Acesso em: 26 nov. 2024.

MASSUCATO, Luana Rainieri et al. Efficiency of Combining Strains Ag87 (*Bacillus megaterium*) and Ag94 (*Lysinibacillus* sp.) as Phosphate Solubilizers and Growth Promoters in Maize. **Microorganisms**, v. 10, n. 7, 2022. DOI: 10.3390/microorganisms10071401.

MINGOTI, Sueli Aparecida. **Análise de dados através de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. 1. ed. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2005. v. 1

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 562–564, 1982.

MOSELA, Mirela et al. *Bacillus velezensis* strain Ag75 as a new multifunctional agent for biocontrol, phosphate solubilization and growth promotion in maize and soybean crops. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-19515-8.

MÜLLER, Tânia Maria; SANDINI, Itacir Eloi; RODRIGUES, João Domingos; NOVAKOWISKI, Jaqueline Huzar; BASI, Simone; KAMINSKI, Tatyanna Hyczy. Combinação de métodos de inoculação de *Azospirillum brasiliense* com adubação nitrogenada de cobertura aumenta produtividade de milho. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 210–215, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20131283.

NETTO PARENTONI, Sidney; LOPES DE SOUZA JÚNIOR, Claudio. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. **Pesquisa agropecuária brasileira**, n. 7, p. 893–901, 2008.

NITSCHKE, Pablo Ricardo; CARAMORI, Paulo Henrique; RICCE, Wilian da Silva; PINTO, Larissa Fernandes Dias. **Atlas climático do estado do Paraná**. 1. ed. Londrina-PR: Instituto Agrônômico do Paraná, 2019. v. 1

NOVAIS, Roberto Ferreira; SMYTH, T. Jot; NUNES, Flancer Novais. Fósforo. *Em*: NOVAIS, Roberto Ferreira; V. ALVAREZ, Víctor Hugo; BARROS, Nairam

Félix De; FONTES, Renildes Lúcio F.; CANTARUTTI, Reinaldo Bertola; NEVES, Júlio César Lima (org.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 1.

OLIVEIRA, Jully Gabriela Retzlaf De; SILVA, Francisco Carlos Mainardes Da; VENDRAME, Pedro Rodolfo Siqueira; BARBOSA, Graziela Moraes de Cesare; OLIVEIRA, José Francirlei De; FILHO, Osvaldo Guedes; RIBEIRO, Lygia de Oliveira; SILVA, Ana Carolina Da; ALIEVI, Alan Alves. **Conhecendo os solos das mesorregiões norte central e norte pioneiro do Paraná**. 1. ed. Cornélio Procopio, PR: NEPAR-SBCS, 2024. v. 1

PAES, Maria Cristina Dias. **Circular Técnica: Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2006. v. 1

PAN, Lin; CAI, Baiyan. Phosphate-Solubilizing Bacteria: Advances in Their Physiology, Molecular Mechanisms and Microbial Community Effects. **Microorganisms**, v. 11, n. 12, 2023. DOI: 10.3390/microorganisms11122904.

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTRELHAS, Paulo César. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. 1. ed. Guaíba: Agropecuaria, 2002. v. 1

PIMENTEL-GOMES, Frederico. **Curso de Estatística Experimental**. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000.

PUGNAIRE, F. I.; CHAPIN, F. S. Environmental and physiological factors governing nutrient resorption efficiency in barley. **Oecologia**, v. 90, p. 120–126, 1992.

SANDAÑA, Patricio. Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. **European Journal of Agronomy**, v. 76, p. 95–106, 2016. DOI: 10.1016/j.eja.2016.02.003.

SCHACHTMAN, Daniel P.; REID, Robert J.; AYLING, S. M. Update on Phosphorus Uptake Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. v. 1, p. 447–453, 1998. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/116/2/447/6085629>.

SCHMILDT, Edilson Romais; CRUZ, Come Damião; ZANUNCIO, José Cola; PEREIRA, Paulo Roberto Gomes; FERRÃO, Romário Gava. Avaliação de métodos de correção do estande para estimar a produtividade em milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, p. 1011–1018, 2001.

SCHULTHESS, Urs; FEIL, Boy; JUTZI, Samuel C. Yield-independent variation in grain nitrogen and phosphorus concentration among Ethiopian wheats. **Agronomy Journal**, v. 89, n. 3, p. 497–506, 1997. DOI: 10.2134/agronj1997.00021962008900030021x.

SERNA-SALDIVAR, Sergio O. **Corn: Chemistry and Technology**. 3. ed. Amsterdã, NL: Elsevier, 2019. v. 1

SFREDO, Gedi Jorge. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral**. 1. ed. Londrina, PR: EMBRAPA, 2008. v. 1

SHARMA, Seema B.; SAYYED, Riyaz Z.; TRIVEDI, Mrugesh H.; GOBI, Thivakaran A. Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for

managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2013. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587.

SHENOY, V. V.; KALAGUDI, G. M. Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping. **Biotechnology Advances**, v. 23, n. 7–8, p. 501–513, 2005. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2005.01.004.

SMITH, C. Wayne; BETRÁN, Javier; RUNGE, Edward C. A. **Corn: Origin, History, Technology, and Production**. Hoboken, NJ: Wiley, 2004. v. 1

SOUZA, Rocheli De; AMBROSINI, Adriana; PASSAGLIA, Luciane M. P. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**, v. 38, n. 4, p. 401–419, 2015. DOI: 10.1590/S1415-475738420150053.

TOWNSLEY, Loni; CARO, Lewis; KELKAR, Hemant; SHANK, Elizabeth A. Draft genome sequence of *Bacillus luciferensis* isolated from soil. **Genome Announcements**, v. 4, n. 5, 2016. DOI: 10.1128/genomeA.01140-16.

TUKEY, John W. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. **Biometrics**, v. 5, n. 2, p. 99–114, 1949. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3001913>.

ULLAH, Abid et al. Drought tolerance improvement in plants: an endophytic bacterial approach. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103, n. 18, p. 7385–7397, 2019. DOI: 10.1007/s00253-019-10045-4.

USDA, United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. **Grain: World Markets and Trade**. 2024. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>. Acesso em: 17 ago. 2024.

VANCE, Carroll P.; UHDE-STONE, Claudia; ALLAN, Deborah L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, n. 3, p. 423–447, 2003. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x.

VERGÜTZ, Leonardus; NOVAIS, Roberto Ferreira De. Recomendação de Corretivos e Adubação. *Em*: BORÉM, Aluízio; GALVÃO, João Carlos Cardoso; PIMENTEL, Marco Aurélio (org.). **Milho: do plantio à colheita**. 1. ed. Viçosa, MG: UFV, 2015. v. 1p. 108–137.

VITORINO, Luciana Cristina; DA SILVA, Elias José; OLIVEIRA, Marilene Silva; SILVA, Isabella de Oliveira; SANTOS, Lorraine da Silva; MENDONÇA, Maria Andréia Corrêa; OLIVEIRA, Thais Cristina Sousa; BESSA, Layara Alexandre. Effect of a *Bacillus velezensis* and *Lysinibacillus fusiformis*-based biofertilizer on phosphorus acquisition and grain yield of soybean. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1433828.

WANG, Xiurong; SHEN, Jianbo; LIAO, Hong. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? **Plant Science**, v. 179, n. 4, p. 302–306, 2010. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.06.007.

YANG, Hongkun; CHEN, Renhua; CHEN, Yufeng; LI, Han; WEI, Ting; XIE, Wei; FAN, Gaoqiong. Agronomic and physiological traits associated with genetic improvement of phosphorus use efficiency of wheat grown in a purple

lithomorphic soil. **Crop Journal**, v. 10, n. 4, p. 1151–1164, 2022. DOI: 10.1016/j.cj.2021.11.010.

ZILLI, Jerri Édson; GIANLUPPI, Vicente; RUBENS, José Campo; ROUWS, Janaina Ribeiro Costa; HUNGRIA, Mariangela. Inoculação da soja com *Bradyrhizobium* no sulco de semeadura alternativamente à inoculação de sementes. **Biologia do Solo**, v. 34, p. 1875–1881, 2010.