

Universidade Federal de São João del-Rei
Programa de Pós-graduação em Bioengenharia

LARISSA ARIEL SAMPAIO

**EFEITO DA INOCULAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SORGO COM
BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO EM SOLOS COM
TEXTURAS CONTRASTANTES**

SÃO JOÃO DEL-REI
MINAS GERAIS – BRASIL
FEVEREIRO DE 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S187e

Sampaio, Larissa Ariel .
EFEITO DA INOCULAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SORGO COM
BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO EM SOLOS COM
TEXTURAS CONTRASTANTES / Larissa Ariel Sampaio ;
orientadora Sylvia Moraes de Sousa Tinôco;
coorientadora Christiane Abreu de Oliveira Paiva . -
Sete Lagoas, 2025.
95 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Bioengenharia) -- Universidade Federal de São João
del-Rei, 2025.

1. BiomaPhos. 2. Inoculante Bacteriano. 3.
Deficiência de Fósforo . 4. Morfologia Radicular. 5.
Micorrização . I. Moraes de Sousa Tinôco, Sylvia,
orient. II. Abreu de Oliveira Paiva , Christiane, co
orient. III. Título.

**EFEITO DA INOCULAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SORGO COM
BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO EM SOLOS
COM TEXTURAS CONTRASTANTES**

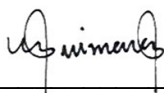
Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Bioengenharia da Universidade Federal de São João del-Rei como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de “Magister Scientiae” (MS).

SÃO JOÃO DEL-REI
MINAS GERAIS – BRASIL
FEVEREIRO DE 2025

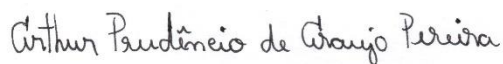
EFEITO DA INOCULAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SORGO COM BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO EM SOLOS COM TEXTURAS CONTRASTANTES

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Bioengenharia da Universidade Federal de São João del-Rei como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de “Magister Scientiae” (MS).

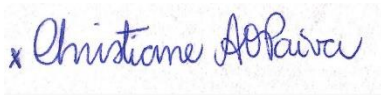
Aprovada em: 19 de fevereiro de 2025



Dra. Cláudia Teixeira Guimarães
(Membro Interno)



Dr. Arthur Prudêncio de Araújo Pereira
(Membro Externo)



Dra. Christiane Abreu de Oliveira Paiva
(Coorientadora)



Dra. Flávia Cristina dos Santos
(Coorientadora)



Dra. Sylvia Moraes de Sousa Tinôco
(Orientadora)

“Se é o dom de servir, então devemos servir; se é o de ensinar, então ensinemos; se é o dom de animar os outros, então animemos. Quem reparte com os outros o que tem, que faça isso com generosidade. Quem tem autoridade, que use a sua autoridade com todo o cuidado”.

Romanos 12:7-8

Agradecimentos

Bom, pode parecer clichê (e talvez até seja) mas gostaria de agradecer primeiramente a Deus. Eu sei que sem Ele eu não conseguiria nem acreditar na minha própria capacidade em passar em um programa de mestrado, e ainda por cima, concluí-lo. Eu poderia citar vários autores célebres: pensamentos, reflexões, poemas etc. Mas depois de tantas citações, e tanta formalidade durante o desenvolvimento desse trabalho, eu escolhi usar esse espaço para falar tudo aquilo que realmente passou dentro da minha mente nesses últimos 3 anos.

Não foi fácil chegar até aqui. Os obstáculos iniciaram desde o momento que decidi tentar ingressar no programa de mestrado. Consigo recordar que esse era um momento bem difícil para minha família e consequentemente da minha vida. Eu não tinha noção nenhuma de inglês, e havia apenas o período de 1 mês e 14 dias para aprender o tal do “inglês instrumental”. Eu passava horas estudando, todos os dias. Para ser honesta, foi até uma ótima distração a respeito da situação caótica do meu âmbito familiar. Um dia antes da avaliação de inglês, minha mãe foi internada às pressas e teria que fazer uma cirurgia de emergência. Eu realmente pensei: “não era para ser”. Mas minha irmã e minha mãe me ligaram e falaram que eu faria a prova sim, passaria, e depois encontraria com elas no pós-operatório. E foi exatamente o que aconteceu.

Como uma recém-formada na graduação, eu não possuía conhecimento nenhum a respeito de como funcionava um mestrado: desde como realizar uma extração de DNA, como até mesmo fazer as etiquetas para os experimentos. Mas, com a ajuda de todos que cruzaram o meu caminho no NBA, eu fui aos poucos aprendendo. Também errei, perdi algumas oportunidades que atualmente jamais perderia, amadureci, fiquei surpresa com os resultados que obtive, com o fato do R não ser mais tão estranho ou impossível de mexer. E o mestrado foi passando, tudo foi fluindo. Até que mais problemas pessoais, mas muito pessoais MESMO aconteceram. Aqueles “problemas” do tipo que você vai lembrar para o resto da vida. Nessa época eu fiquei meio perdida, mas jurei para mim mesma que não iria deixar meu sonho morrer. Demorou mais do que o

planejado, mas hoje estou aqui escrevendo os agradecimentos do meu mestrado, e em breve vou poder ser chamada de mestre. Isso para mim é muito mais do que um título: é uma prova de que apesar de todas as adversidades da vida, eu sou muito mais forte e capaz do que imagino.

A respeito dos agradecimentos individuais gostaria de ressaltar minha mãe, ela nunca mediu esforços para que eu conseguisse levantar e continuar a trilhar meus caminhos. A minha irmã, que sempre foi o ponto de equilíbrio da minha vida. O meu pai que sempre foi o porto seguro de toda a família, que independente do problema que estivéssemos passando, nós sabíamos que ele sempre daria um jeito. Claro, a Sylvia, a profissional mais completa que já tive o privilégio de conhecer e poder dizer que trabalhei junto: uma mulher de inteligência surreal, didática indescritível, que ao mesmo tempo consegue ser humana, amiga e mãezona dos seus orientados. E a todos aos meus colegas da equipe Roots, eu tenho imensa gratidão e desejo as melhores coisas desse mundo! Pois sei que de alguma forma vocês me ajudaram a chegar até aqui, mesmo que sem saber. E por último, a Fazenda Trijunção e a equipe da Embrapa Milho e Sorgo, por me acolher, disponibilizar tempo, conhecimento e os recursos necessários para o desenvolvimento de todo o trabalho.

SAMPAIO, Larissa Ariel (MS). Universidade Federal de São João del-Rei, Fevereiro de 2025. **Effect of inoculation of sorghum genotypes with phosphate-solubilizing bacteria in soils with contrasting textures.** Orientadora: Dra. Sylvia Morais de Sousa Tinôco. Coorientadoras: Dra. Flavia Cristina Santos e Dra. Christiane de Oliveira Paiva

RESUMO

O cultivo de sorgo no Brasil tem avançado para solos arenosos e de textura média, caracterizados pela baixa disponibilidade de fósforo (P). Nessas condições desafiadoras, o uso de bactérias promotoras de crescimento vegetal pode ser uma estratégia eficaz para aumentar o rendimento das culturas. Este estudo avaliou o efeito de um bionoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato em genótipos de sorgo cultivados em solos contrastantes. Sementes dos genótipos de sorgo BRS373 e BRS332 foram inoculadas com cinco doses do bioinoculante BiomaPhos® (0, 50, 100, 200 e 500 mL ha⁻¹) e reinoculadas após 15 dias em solos arenoso (Jaborandi/BA) e argiloso (Sete Lagoas/MG), sob casa de vegetação. Após 40 dias, o peso seco e a morfologia radicular foram analisadas. Posteriormente, realizou-se experimento em solo arenoso (Jaborandi/BA), com delineamento em blocos inteiramente casualizados (2x5), sendo dois genótipos (BRS373 e BRS310) e cinco doses de bioinoculante. Na fase de florescimento, a coroa das raízes foi coletada para análise da arquitetura radicular, o solo rizosférico e não rizosférico foram coletados para análise de diversidade microbiana por T-RFLP, e as raízes finas para colonização de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). O DNA total foi extraído e os genes 16S rRNA (bactérias) e 28S rRNA (fungos) amplificados e digeridos com enzimas de restrição. Os fragmentos foram genotipados e analisados, determinando-se a abundância relativa das espécies microbianas. Em casa de vegetação, para o genótipo BRS373, a inoculação reduziu parâmetros radiculares e massa seca em ambos os solos. Para BRS332, houve aumento no diâmetro radicular em solo argiloso. A dose de 50 mL ha⁻¹ promoveu incremento significativo na massa seca de raízes e parte aérea, além do comprimento e área radicular em ambos os solos. No experimento de campo, observou-se diferença significativa na diversidade bacteriana entre os genótipos e entre doses de Bioinoculante. As

doses mais altas e mais baixas apresentaram padrões distintos para BRS3010 e BRS373. No entanto, não houve diferenças para diversidade de FMA, no entanto a colonização por FMAs foi maior na dose mais elevada do inoculante. Os resultados ampliam o conhecimento sobre a microbiota do sorgo e ressaltam a importância do genótipo e da dose do inoculante para otimizar seu uso nas fronteiras agrícolas.

Palavras-chave: BiomaPhos®; inoculante bacteriano; deficiência de fósforo; morfologia radicular micorrização; *Sorghum bicolor*.

SAMPAIO, Larissa Ariel (MS). Universidade Federal de São João del-Rei, February of 2025. **Efeito da inoculação de genótipos de sorgo com microrganismos solubilizadores de fosfato em solos com texturas contrastantes**. Advisor: Dra. Sylvia Moraes de Sousa Tinoco. Co-advisors: Dra. Flavia Cristina Santos e Dra. Christiane de Oliveira Paiva

ABSTRACT

The cultivation of sorghum in Brazil has expanded to sandy and medium-textured soils, which are characterized by low phosphorus (P) availability. Under these challenging conditions, the use of plant growth-promoting bacteria can be an effective strategy to enhance crop yields. This study evaluated the effect of a phosphate-solubilizing bacteria-based bioinoculant on sorghum genotypes grown in contrasting soils. Seeds of sorghum genotypes BRS373 and BRS332 were inoculated with five doses of the bioinoculant BiomaPhos® (0, 50, 100, 200, and 500 mL ha⁻¹) and reinoculated after 15 days in sandy (Jaborandi/BA) and clayey (Sete Lagoas/MG) soils under greenhouse conditions. After 40 days, dry weight and root morphology were analyzed. Subsequently, a field experiment was conducted in sandy soil (Jaborandi/BA) using a completely randomized block design (2x5), with two genotypes (BRS373 and BRS310) and five bioinoculant doses. During the flowering stage, root crowns were collected for root architecture analysis, rhizospheric and non-rhizospheric soil samples were collected for microbial diversity analysis using T-RFLP, and fine roots were collected for arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) colonization assessment. Total DNA was extracted, and the 16S rRNA (bacteria) and 28S rRNA (fungi) genes were amplified and digested with restriction enzymes. The fragments were genotyped, determining the relative abundance of microbial species. Under greenhouse conditions, for genotype BRS373, inoculation reduced root parameters and dry mass in both soil types. For BRS332, there was an increase in root diameter in clayey soil. The 50 mL ha⁻¹ dose significantly increased root and shoot dry mass, as well as root length and surface area in both soils. In the field experiment, significant differences were observed in bacterial diversity between genotypes and bioinoculant doses. The highest and lowest doses showed distinct patterns

X
for BRS3010 and BRS373. However, no significant differences were found for AMF diversity, although AMF colonization was higher at the highest bioinoculant dose. These results expand the understanding of sorghum microbiota and highlight the importance of considering both genotype and inoculant dose to optimize its use in agricultural frontiers.

Keywords: Bacterial inoculant; BiomaPhos®; phosphorus deficiency; mycorrhization; root morphology; *Sorghum bicolor*.

LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO I

Figura 1. Análise de componentes principais para as características de morfologia radicular, peso seco e nutrientes dos genótipos BRS332 e BRS373 crescidos com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato em solo arenoso.....52

Figura 2. Análise de componentes principais para as características de morfologia radicular, peso seco e nutrientes dos genótipos BRS332 e BRS373 crescidos com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato em solo argiloso. 54

LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO II

Figura 1. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade bacteriana do genótipo BRS 310 e BRS 37375

Figura 2. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade bacteriana do solo rizosférico do genótipo BRS 310..... 76

Figura 3. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade bacteriana do solo rizosférico do genótipo do genótipo BRS 373 de sorgo com diferentes doses de BiomaPhos®.
..... 77

Figura 4. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade fúngica do genótipo BRS 310 e BRS 37378

Figura 5. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade fúngica do genótipo BRS 310 do solo rizosférico de sorgo com diferentes doses de BiomaPhos®
..... 79

Figura 6. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade fúngica do genótipo BRS 373 do solo rizosférico de sorgo com diferentes doses de BiomaPhos®

.....	80
-------	----

Figura 7. Abundância relativa dos filos Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Cyanobacteria, Chloroflexi, Myxococcota, Bacteroidota, Thermodesulfobacteriota, Aquificota, Verrucomicrobiota, Chloroflexota, Campylobacterota para os genótipos BRS310 e BRS373.

.....	81
-------	----

Figura 8. Análise de componentes principais para as características de morfologia radicular, peso seco e nutrientes dos genótipos BRS310 (●) e BRS373 (●) crescidos com diferentes doses de Bioinoculante em solo arenoso

.....	85
-------	----

LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO I

Tabela 1. Análise dos solos arenoso e argiloso utilizado no experimento em casa de vegetação, antes da instalação do ensaio.....	40
Tabela 2. Quantidade de fertilizantes aplicados para preparação dos solos arenoso e argiloso em casa de vegetação	41
Tabela 3. Análise de variância para as médias das características comprimento radicular total (CR), diâmetro radicular médio (D), área de superfície de raízes com 0 a 1 mm (AS1) e 1 a 2 mm (AS2) e peso seco da parte aérea (PSPA), raiz (PSR) e total (PST) de sorgo inoculado com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato crescidos em solos de textura contrastante em casa de vegetação.....	44
Tabela 4. Análise de variância para concentração de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) da parte aérea (N_PA, P_PA e K_PA) e raiz (N_R, P_R e K_R) e P_resina de solo rizosférico dos genótipos BRS 332 e BRS 373 de sorgo inoculados com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato e cultivados em solos de textura contrastante em casa de vegetação.....	45
Tabela 5. Média das características de morfologia radicular e peso seco do genótipo BRS 332 de sorgo inoculados com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato e cultivado em solos de texturas contrastantes em casa de vegetação.....	47
Tabela 6. Média das características de morfologia radicular e peso seco do genótipo BRS 373 de sorgo inoculados com diferentes doses bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato e cultivado em solos de texturas contrastantes em casa de vegetação.....	48

Tabela 7. Média dos valores de macronutrientes (N P K) na raiz e parte aérea e P no solo (P_{resina}) do genótipo de sorgo BRS 332 inoculado com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato cultivado em solos arenoso e argiloso por 40 dias.....49

Tabela 8. Média dos valores de macronutrientes (N P K) na raiz e parte aérea e P no solo (P_{resina}) do genótipo de sorgo BRS 373 inoculado com diferentes doses de Bioinoculante cultivado em solo arenoso e argiloso por 40 dias.....50

Tabela 9. Análise de componentes principais em solo arenoso para as características morfológicas do sistema radicular (comprimento total, diâmetro médio e áreas de superfície) conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio na raiz e solo rizosférico.....53

Tabela 10. Análise de componentes principais em solo argiloso para as características morfológicas do sistema radicular (comprimento total, diâmetro médio e áreas de superfície) conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio na raiz e solo rizosférico.....55

LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO II

Tabela 1. Descrição das características das raízes de milho de acordo com BUCKSCH et al., 2014	64
Tabela 2. Análise de variância das características agronômicas e nutricionais para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.....	69
Tabela 3. Teste de Média das características agronômicas e nutricionais para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em com diferentes doses arenoso de Bioinoculante.....	70
Tabela 4. Análise de variância das características de arquitetura radicular (AREA, WIDTH_MAX, D10, SKL_WIDTH, ANG_TOP, STA_MAX e RTA_MAX_ para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo cultivados em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.....	73
Tabela 5. Médias das características de arquitetura radicular (AREA, WIDTH_MAX, D10, SKL_WIDTH, ANG_TOP, STA_MAX e RTA_MAX_ para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo cultivados em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.....	74
Tabela 6. Análise de variância da abundância dos filos Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Cyanobacteria, Chloroflexi, Myxococcota, Bacteroidota, Thermodesulfobacteriota, Aquificota, Verrucomicrobiota, Chloroflexota, Campylobacterota e outros para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em solo de textura arenosa com diferentes doses de Bioinoculante.....	82

Tabela 7. Teste de média da abundância dos filos Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Cyanobacteria, Chloroflexi, Myxococcota, Bacteroidota, Thermodesulfobacteriota, Aquificota, Verrucomicrobiota, Chloroflexota, Campylobacterota e outros para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em solo de textura arenosa com diferentes doses de Bioinoculante82

Tabela 8. Análise de variância da atividade enzimática dos genótipos de sorgo BRS 310 e BRS 373, crescidos em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante83

Tabela 9. Atividade de fosfatase ácida e fosfatase alcalina dos genótipos de sorgo BRS 310 e BRS 373, crescidos em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.....83

Tabela 10. Taxa de colonização micorrízica (%) dos genótipos de sorgo BRS 310 e BRS 373, crescidos em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.....84

Tabela 11. Análise de componentes principais em solo arenoso para as características de massa seca, produtividade, P_resina, nitrogênio (ext), fósforo (ext), potássio (ext), AREA, WIDTH_MED e ANG_TOP.....85

SUMÁRIO

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
OBJETIVO GERAL	37
CAPÍTULO I – INOCULAÇÃO DE GÉNOTIPOS DE SORGO COM BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO EM SOLOS DE TEXTURA CONTRASTANTES	38
Introdução	38
Material e Métodos	39
Análise Estatística	42
Resultados	42
Discussão	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
CAPÍTULO II – EFEITO DA INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO EM SOLO ARENOSO	62
Introdução	62
Metodologia	63
Resultados	68
DISCUSSÃO	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
CONCLUSÃO GERAL	95

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

CULTURA DO SORGO

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é o quinto cereal mais produzido no Brasil. Na safra 2021/2022, o país alcançou 2,85 milhões de toneladas, marcando um aumento de 36,9% em relação à safra anterior (CONAB, 2021). Sendo extremamente versátil, o sorgo tem uma ampla gama de usos, desde a alimentação humana e animal até a produção de biocombustíveis. Enquanto nos continentes asiático e africano o sorgo é principalmente destinado à alimentação humana, em países ocidentais como Estados Unidos, Austrália e Brasil, é predominantemente utilizado na alimentação animal (VIEIRA et al., 2020; HAO et al., 2021). Os principais produtores mundiais de sorgo incluem Estados Unidos, Sudão, México, Nigéria, Índia, Níger, Etiópia, Austrália, Brasil e China, responsáveis por cerca de 77% da produção global (ARUNA & CHERUKU, 2018).

O sorgo é uma planta C4, autógama, com baixa taxa de fecundação cruzada, e seu crescimento ótimo ocorre em temperaturas acima de 21°C (SANTIN et al., 2020). Sua semente é composta por três partes distintas, pericarpo, endosperma e gérmen, além da testa pigmentada, que contém os taninos. Essa estrutura diferenciada é relevante, pois influencia tanto na qualidade quanto nas propriedades tecnológicas, nutricionais e funcionais do sorgo (MARTINO et al., 2014). Os carboidratos representam cerca de 75% do grão, enquanto o teor de proteínas é de aproximadamente 11,3% e o teor de lipídios cerca de 3% (QUEIROZ et al., 2011).

Existem cinco tipos principais de sorgo, granífero, sacarino, vassoura, forrageiro e sudanense. A ampla adaptação e a versatilidade do uso final do sorgo estão conectadas à sua diversidade genética natural e plasticidade fenotípica (RICHARD, 2019). Por possuir um sistema radicular profundo que lhe permite uma maior exploração do solo, a cultura do sorgo tem sido utilizada na produção de grãos e forragem quando o déficit hídrico é uma ameaça para outras culturas. A cultura do sorgo apresenta maior eficiência na utilização de água quando comparado a outros cereais, como o milho. Além do mais o sorgo tem a

capacidade de encher grãos durante a seca de final de temporada. Por isso, o sorgo pode ser cultivado em regiões mais quentes e secas, pois apresenta diversas vantagens e mecanismos de defesa quando comparado a outros cereais de verão (TARDIN et al., 2013; BORELL et al., 2021; MENEZES et al., 2021).

Pelo fato de o sorgo ser uma cultura mais resistente ao estresse hídrico e as altas temperaturas, além de ter um bom valor nutricional, o custo do grão de sorgo na alimentação animal é, em média, 25% inferior ao do milho, enquanto seu valor biológico, medido na forma de energia metabolizável, alcança, pelo menos, 95% do valor do milho. Assim, o sorgo surge como uma cultura de grande ascensão, que pode trazer grande economia e benefícios para a produção, além de ser uma boa opção de substituição do milho em locais com temperaturas mais elevadas e com estresse hídrico (MENEZES et al., 2021).

FÓSFORO – UM ELEMENTO ESSENCIAL

O fósforo (P) é um elemento vital para todos os seres vivos, participando de vários processos metabólicos essenciais, como a biossíntese de macromoléculas, fotossíntese e respiração celular. Ele é crucial na formação de compostos como ATP e NADPH, ácidos nucleicos, fosfatos de açúcar e fosfolipídios, todos importantes para o processo fotossintético e como grandes fontes de energia celular (CARSTENSEN et al., 2018; VASCONCELOS et al., 2021). A deficiência de P no início do ciclo vegetativo das plantas pode causar perdas irreparáveis em crescimento e desenvolvimento, sendo difícil a sua recuperação mesmo com suprimento posterior de P em níveis adequados.

Para se adaptar a condições de baixo de P, as plantas desenvolveram várias estratégias, como a modificação da morfologia das raízes, a exsudação de ácidos orgânicos e fosfatases, e o estabelecimento de relações simbióticas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e outros microrganismos. A liberação de exsudatos pelas raízes e pelos radiculares auxilia a atividade dos microrganismos, alterando a comunidade microbiana do solo. Além disso, esses exsudatos promovem a agregação do solo, melhorando sua porosidade e qualidade. A forma como os exsudatos atuam no solo varia de acordo com o genótipo da planta e o tipo de raiz (GOMES et al., 2018; ZHANG et al., 2019).

FERTILIZAÇÃO FOSFATADA NO SISTEMA AGRÍCOLA

A maioria dos solos agrícolas possui altas concentrações de P em formas orgânicas e inorgânicas. No entanto, isso não garante que o P esteja prontamente disponível para as plantas. Solos altamente intemperizados e ácidos, como Latossolos e Argissolos, geralmente apresentam baixa disponibilidade de P para as plantas. Isso ocorre porque o P no solo é imobilizado e precipitado por minerais como ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca). Assim, mesmo quando P é adicionado ao solo como fertilizante solúvel, a maior parte forma complexos insolúveis, indisponíveis para as plantas. As fontes naturais reativas são mais eficientes como fertilizantes fosfatados, pois sua solubilização gradual do P limita a adsorção pelas argilas (NOVAIS et al., 2007; BATTINI et al., 2017; SOUSA et. al., 2008; MENEZES et al., 2021).

Entre os fertilizantes fosfatados disponíveis no mercado, destacam-se os fosfatos solúveis, conhecidos por sua alta concentração de P, e os fosfatos naturais, que têm menor concentração de P e são pouco solúveis em água. A principal diferença entre essas duas fontes de P é a velocidade de liberação para as plantas e a fixação no solo (KORNDÖRFER et al., 1999). Os fosfatos de origem natural podem ser classificados pela sua reatividade, sendo que a maioria das fontes brasileiras é pouco reativa. Comparando o fosfato natural brasileiro Itafós, com 23,2% de P_2O_5 total e 5,5% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2%, com o fosfato natural de Gafsa, da Tunísia, com 29,6% de P_2O_5 total e 10% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2%, percebe-se a baixa reatividade e concentração das fontes de fosfato natural disponíveis no Brasil (BRASIL, 2007).

No Brasil, devido à demanda do agronegócio, cerca de 70% dos fertilizantes nitrogenados e fosfatados e mais de 95% dos fertilizantes potássicos são importados (Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2019; GLOBALFERT, 2021). A dependência de importação eleva os custos de produção e representa um risco para a agricultura, pois oscilações no mercado externo afetam diretamente o agronegócio. Isso dificulta a competitividade e o desenvolvimento do setor agrícola brasileiro (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021). Os fertilizantes são essenciais na agricultura moderna, mas é crucial entender como eles atuam no solo para evitar seu uso excessivo, mitigar o impacto ambiental e reduzir os custos de produção (ADESEMOYE, 2009).

A eficiência do uso de fertilizantes fosfatados em solos brasileiros é variável, para o café (~2,5%), cana-de-açúcar, algodão, feijão e laranja (18–40%) é baixa, para a soja, trigo e arroz (45–60%) é razoável e alta apenas para o milho (60–90%). Isso se deve ao pH ácido dos solos tropicais, que exige correção frequente por calagem para evitar a formação de fosfatos de Fe e Al insolúveis, facilitando a absorção de P (NOVAIS; SMITH, 1999; PAVINATO et al., 2020). No entanto, a maioria dos solos tropicais é naturalmente ácida, dificultando a eficiência dos fertilizantes fosfatados (NUNES, 2011) e o desenvolvimento de culturas agrícolas (DHILLON et al., 2017; PAVINATO et al., 2020). Nos últimos anos, o valor dos fertilizantes fosfatados aumentou substancialmente, ultrapassando 100% em 12 meses em 2021 e sofrendo novas flutuações no início de 2022. Um dos principais motivos para essa elevação foi a eclosão da guerra entre a Rússia e a Ucrânia, países que são grandes exportadores de fertilizantes (CNA, 2021; CNA, 2022; ARGENTA et al., 2023). Além de seu alto custo, os fertilizantes fosfatados são recursos com fontes finitas (VILLAMIZAR et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

FUNÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO SOLO

As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo estão diretamente ligadas à sua saúde, uma vez que os solos apresentam diferenças nessas características (KURAMAE et al., 2012; LIU et al., 2018). A porosidade do solo interfere diretamente na constituição das comunidades bacterianas, pois, de acordo com a porosidade, são alteradas a absorção de água, a quantidade de matéria orgânica e os nutrientes. Solos com frações de tamanho pequeno possuem maior diversidade de microrganismos devido aos maiores teores de argila, que auxiliam na retenção de água, presença de matéria orgânica, e maiores teores de carbono (C) e nitrogênio (N), criando um ambiente mais favorável para as comunidades de microrganismos (SESSITSCH et al., 2020). Solos de superfície arenosa podem ter porosidade variável entre 35% a 50%, enquanto solos de textura mais fina normalmente variam de 40% a 60%. Subsolos compactos podem ter apenas 25% a 30% de espaço total de poros (HAO et al., 2007).

Os minerais de argila fornecem cargas superficiais que protegem o carbono nos solos, formando complexos organominerais e estabelecendo agregados que protegem a matéria orgânica do solo (SARKAR & DAS, 2018). Por isso, solos de textura argilosa tendem a ter maior teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, apresentam maior riqueza quando comparados aos solos arenosos (HU et al., 2020). Os solos arenosos possuem menor retenção de água, menores teores de matéria orgânica e carbono orgânico, além de maior suscetibilidade à erosão e lixiviação de nutrientes (SILVIA et al., 2021b).

BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS

Os microrganismos desempenham um papel essencial na biodiversidade do solo, sendo responsáveis pela decomposição de restos vegetais e secreção de enzimas extracelulares. Os microrganismos são fundamentais para a manutenção da matéria orgânica do solo e de nutrientes, sendo importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas (BARNETT, 2020).

A inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) aumenta o crescimento das plantas e sua resistência a estresses abióticos através de diferentes mecanismos. Essas bactérias liberam ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como ácido glucônico e ácido cítrico, que formam ligações com óxidos de ferro (FePO_4), alumínio (AlPO_4) e cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Além disso, liberam hidroxilas e carboxilas quelantes, tornando o fósforo prontamente disponível para as plantas. Isso melhora a eficiência e facilidade de acesso ao fósforo pela planta, resultando em modificações morfológicas e bioquímicas na arquitetura radicular (RODRIGUEZ et al., 2004; MOSIMANN et al., 2017; ETESAMI & MAHESHWARI, 2018; QUEIROZ & OLIVEIRA, 2023).

As BPCPs também aumentam a resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos devido à produção de enzimas como ACC-deaminase (acetil-CoA carboxilase), que reduz o nível de etileno na planta, além da produção de exopolissacarídeos (EPS), acúmulo de osmólitos e ativação do sistema antioxidante. As BPCPs auxiliam na captação mais eficiente de água e nutrientes do solo, melhorando o ancoramento das raízes e,

consequentemente, sua proteção (SAGHAFI et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2020). Dessa forma, as BPCPs aumentam a sobrevivência e resistência das plantas.

As BPCPs podem afetar diretamente a aquisição de nutrientes, transformando formas indisponíveis para as plantas em formas disponíveis, por meio da fixação de nitrogênio (N_2), solubilização de P inorgânico ou mineralização de P orgânico, ou indiretamente, promovendo o crescimento radicular (MOSIMANN et al., 2017).

MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO

A inoculação com os microrganismos solubilizadores de fosfato (MSF) é realizada desde a década de 1950, em países como Brasil, Índia, China e Paquistão. Porém, nos últimos anos o uso de inoculantes com microrganismos tem sido intensificado, principalmente com o intuito de reduzir custos na produção, e auxiliar na sustentabilidade agrícola e segurança alimentar (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021; SANTOS et al., 2021).

Bactérias das espécies *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Burkholderia* e *Bacillus*, e alguns fungos filamentosos dos gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* são conhecidos como solubilizadores de fosfato por aumentar a disponibilidade de P para as plantas (OLIVEIRA et al., 2022). No solo, os MSF secretam compostos fenólicos, prótons e ácidos orgânicos resultando na acidificação do solo e subsequente liberação de P de $Ca_3(PO_4)_2$ em solos calcários, podendo atuar diretamente na solubilização do P e/ou na liberação de fosfatos solúveis por meio de sua ação quelante sobre cátions (OLIVEIRA et al., 2020). Diversos estudos são realizados no intuito da identificação de cepas que possuam mecanismos que auxiliem no crescimento e desenvolvimento das plantas (SINGH et al., 2019).

BACTÉRIAS DO GÊNERO *BACILLUS*

Bactérias do gênero *Bacillus* são gram-positivas, aeróbias e pertencem a um grupo heterogêneo com aproximadamente 360 espécies. Essas bactérias são amplamente conhecidas por aumentar a solubilização de nutrientes e sua mobilização no solo (RIBEIRO et al., 2021). A mobilização de P no solo realizada

pelas bactérias do gênero *Bacillus* pode ocorrer por meio de dois processos, secreção de ânions orgânicos, como ácido glucônico, que dissolve o material fosfático e/ou quela cátions que estejam acompanhados ao ânion de fosfato, e produção de enzimas fitase/fosfatase que hidrolisam formas orgânicas de compostos fosfatados (BATTINI et al., 2017).

Outro fator positivo das bactérias do gênero *Bacillus* é a produção de metabólitos antimicrobianos que podem atuar como biopesticidas nas plantas, sendo um excelente substituto para produtos químicos (HASMEN, 2019). Várias estirpes de *Bacillus* são capazes de sintetizar análogos a fitohormônios, como ácido indol-acético (AIA). O AIA afeta atividades funcionais da planta, como divisão celular, alongamento, iniciação da raiz e do fruto. Dessa forma, esse fitohormônio atua no aumento do crescimento da raiz e/ou maior formação de raízes laterais e pelos radiculares, aumentando a área de superfície e, conseqüentemente, melhorando a aquisição de água e nutrientes. Isso auxilia na alocação de recursos, aumentando o acúmulo de biomassa das plantas e sua resistência ao déficit hídrico (GOMES et al., 2018; RIBEIRO et al., 2021).

Geralmente, bactérias do gênero *Bacillus* são escolhidas na formulação de inoculantes, pois são consideradas mais estáveis no ambiente devido à formação de endósporos, o que permite adaptação a condições abióticas extremas, como variações de temperatura, pH ou exposição a pesticidas (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020b).

O USO DE BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO

O BiomaPhos® é um produto desenvolvido pela Embrapa em parceria com a empresa Bioma, com o objetivo de aumentar a eficiência das plantas na absorção de fósforo através do uso de microrganismos solubilizadores de fosfato (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021). Esse bioinoculante foi formulado a partir do consórcio das estirpes CNPMS B119 (*Bacillus megaterium*) e B2084 (*Bacillus subtilis*). Essas bactérias aumentam a disponibilidade de fósforo no solo através da produção de ácidos orgânicos que mobilizam o P em formas precipitadas em minerais, além de fosfatases que mobilizam o fósforo presente na matéria orgânica.

A estirpe CNPMS B119 foi isolada da rizosfera de milho e possui a capacidade de solubilizar fosfatos de cálcio e produzir fosfatase, enquanto a estirpe CNPMS B2084 é endofítica, solubiliza fosfatos de cálcio e ferro, e apresenta alta produção de ácido glucônico e enzima fitase (ABREU et al., 2017; DE SOUSA et al., 2020; OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020b; VELLOSO et al., 2020). O BiomaPhos® pode ajudar a tornar o fósforo mais disponível para a planta, resultando em um maior acúmulo desse nutriente nos tecidos, principalmente nos grãos. Nesse sentido, o BiomaPhos® é uma excelente alternativa para maximizar o aproveitamento e a absorção do P já presente no solo e do fósforo adicionado a partir de fertilizantes (RIBEIRO et al., 2018; OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020a).

O BiomaPhos® é um inoculante disponível na forma líquida, sendo aplicado diretamente nas sementes ou no sulco do plantio. Dessa forma, o BiomaPhos® associa-se às raízes desde o início do desenvolvimento da planta, por meio da colonização da região da rizosfera (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020b). O bioinoculante também pode ser aplicado por meio de pulverização do solo ou pulverização foliar, que pode ser realizada durante o crescimento das plantas (SANTOS et al., 2021). Em avaliações realizadas com a produção de milho e soja, onde houve a aplicação da adubação fosfatada conforme a demanda do local, o uso do BiomaPhos® resultou em um ganho médio de produtividade de milho de 8,9% e de soja de 6,3% (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020a).

USO DO POLIMORFISMO DE COMPRIMENTO DE FRAGMENTOS DE RESTRIÇÃO TERMINAL (T-RFLP) PARA O ESTUDO DA MICROBIOTA RIZOSFÉRICA

No intuito de compreender a estrutura e função das comunidades microbianas presentes nos componentes edáficos e na rizosfera são feitas análises comparativas dessas comunidades por meio de técnicas que utilizam ácidos nucleicos de regiões ribossômicas conservadas. Essas técnicas permitem avaliar um número maior de microrganismos em comparação com outras abordagens dependentes de cultivo (MIETHLING et al., 2000; SCHALLMACH et al., 2000; CHAUHAN et al., 2011; TOJU et al., 2012; KLINDWORTH et al., 2013; PEIFFER et al., 2013; LI et al., 2014; YANG et al., 2017). Por meio da

metagenômica é possível identificar os microrganismos de uma amostra de interesse e analisar a abundância e a função de cada gene.

A técnica de T-RFLP (*Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism*) permite uma estimativa rápida e precisa da riqueza microbiana e da composição da comunidade. Comparada a outras técnicas, apresenta maior simplicidade de execução, custo reduzido e independência de cultivo. A técnica é realizada por meio da análise de fragmentos do gene eucariótico 18S ou procariótico 16S rRNA amplificados pela reação em cadeia da polimerase (PCR). A partir disso, são definidas diferenças nos tamanhos dos T-RFs, que refletem polimorfismos nas sequências dos genes 18S ou 16S rRNA. Assim, pelo padrão dos T-RFs, é possível avaliar a composição das populações numericamente dominantes na comunidade microbiana e identificar as populações que são filogeneticamente distintas (TIQUIA et al., 2005; TRABELSI et al., 2017; ZHANG et al., 2018; CAMPOLINO, 2022).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. S. de; FIGUEIREDO, J. E. F.; OLIVEIRA, C. A.; SANTOS, V. L.dos; GOMES, E. A.; RIBEIRO, V. P.; BARROS, B. de A.; LANA, U. G. de P.; MARRIEL, I. E. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017.
- ADESEMOYE, A. O.; TORBERT, H.A.; KLOEPPER, J. W. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Allow Reduced Application Rates of Chemical Fertilizers. **Plant Microbe Interactions**, p. 921-929, 2009.
- ADHAN, M.; FAHAD, S.; ZAMIN, M.; SHAH, S.; MIAN, I. A.; DANISH, S.; ZAFAR-UL-HYE, M.; BATTAGLIA, M. L.; NAZ, R. M. M.; SAEED, B.; SAUD, SHAH, S.; AHMAD, I.; YUE, Z.; BRTNICKY, M.; HOLATKO, J.; DATTA, R. Coupling Phosphate-Solubilizing Bacteria with Phosphorus Supplements Improve Maize Phosphorus Acquisition and Growth under Lime Induced Salinity Stress. **Plants**, p. 1-19, 2020.
- ARGENTA, C. V.; BRUM, A. L.; ALLEBRANT, A. A. M. A realidade do mercado de fertilizantes no Brasil: uma breve análise. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente - RAMA**, v.16, n.3, 2023.
- ARUNA, C.; CHERUKU, D. Genetic improvement of grain sorghum. In: Aruna C, Visarada KBRS, Bhat BV, Tonapi VA (eds) Breeding sorghum for diverse end uses. **Woodhead Publishing**, Cambridge - UK, p. 157–173, 2018.
- BARNETT, S. E.; YOUNGBLUT, N. D.; BUCKLEY, D. H. Soil characteristics and land-use drive bacterial community assembly patterns. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 96, 2020.
- BATTINI, F.; GROLUND, M.; AGNOLUCCI, M.; GIOVANNETTI, M.; JAKOBSEN. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bactéria. **Scientific Reports**, p. 1-11, 2017.
- BOLETIM da safra de grãos. **Companhia Nacional de Abastecimento**, 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>.
- BORELL, A.; OOSTEROM, E. V.; GEORGE-JAEGGLI, B.; RODRIGUEZ, D.; EYRE, J.; JORDAN, D. J.; MACE, E.; SINGH, V.; VADEZ, V.; BELL, M.;

CAMPOLINO, M. L. **Comunidade Microbiana Rizosférica e Morfo-Fisiologia de Raízes de Genótipos de Milho e Sorgo Adubados com Fosfatos de Diferentes Reatividades e Doses de Fósforo**. 2022. 133 f. Tese (Doutorado em Bioengenharia) - Universidade Federal de São João Del-Rei, Sete Lagoas, 2022.

CHAUHAN, P. S.; CHAUDHRY, V.; MISHRA, S.; NAUTIYAL, C. S. Uncultured bacterial diversity in tropical maize (*Zea mays* L.) rhizosphere. **Journal of Basic Microbiology**, p. 15-32, 2011.

CHEIN, H. KAYAN, M. HUANG, Y. ZHIYUAN, Y. CHENGJIN, C. Stable Soil Microbial Functional Structure Responding to Biodiversity Loss Based on Metagenomic Evidences. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 1-11, 2021.

CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Panorama do agro: semana 13 a 17 de dezembro de 2021. Brasília, 2021. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/publicacoes/panorama-agro-13-a-17-dezembro-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1> Acesso em: 29 jan 2024.

CNA -Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Taxa de câmbio e fertilizantes:efeitos na composição dos custos de produção de cana-de-açúcar. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://cnabrasil.org.br/publicacoes/dependencia-do-mercado-externo-de-fertilizantes-expoe-produtores-de-cana-de-acucar-brasileiros-as-oscilacoes-de-precos-e-cambio>>. Acesso em: 29 jan 2024.DHILLON, J.; TORRES, G.; DRIVER, E.; FIGUEIREDO, B.; RAUN, W. R. World phosphorus use efficiency in cereal crop. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 4, article 1670, 2017.

- ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 156, p. 225-246, 2018.
- GEISEN, S.; BRIONES, M. J. I.; GAN, H.; BEHAN-PELLETIER, V.; FRIMAN, V. P.; GROOT, A.; HANNULA, S. E.; LINDO, Z.; PHILIPPOT, L.; TIUNOV, A. V.; WALL, D. H. A methodological framework to embrace soil biodiversity. **Soil Biology and Biochemistry**, p. 1-15, 2019.
- GLOBALFERT. **Importação de fertilizantes bate recorde em 2020**.
- GOMES, E. A.; LANA, U. G. P.; QUENSEN, J. F.; SOUSA, S. M.; OLIVEIRA, C. A.; GUO, J.; GUIMARÃES, L. J. M.; TIEDJE, J. M. Root-Associated Microbiome of Maize Genotypes with Contrasting Phosphorus Use Efficiency. **Phytobiomes Journal**, v. 2, n. 3, p. 2471-2906, 2018.
- GRANADA, C. E.; PASSAGLIA, L. M. P.; SOUZA, E. M. de; SPEROTTO, R. A. Is phosphate solubilization the forgotten child of plant growth-promoting rhizobacteria? **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 1-4, 2018.
- HASMEM, A.; TABASSUM, B.; ABD-ALLAH, E. F. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, p. 1291-1297, 2019.
- HÍBRIDO BRS 332: produtividade de grãos e sanidade. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 1-2, 2009.
- HÍBRIDO BRS 373: híbrido de sorgo granífero: produtividade e precocidade. **Embrapa Milho e Sorgo**. p. 1-2, 2016.
- HAO, H.; LI, Z.; LENG, C.; LU, C.; LUO, H.; LIU, Y.; WU, X.; LIU, Z.; SHANG, LI.; JING, H. C. Sorghum breeding in the genomic era: opportunities and challenges. **Theoretical and Applied Genetics**, 2021.
- HAO, X.; BALL, BC.; CULLEY, J. B. L.; CARTER, M. R.; PARKIN, G. W. Soil Density and Porosity. **Soil Sampling and Methods of Analysis**, p. 1-18, 2007.
- HU, Y.; ZHENG, Q.; NOLL, L.; ZHANG, S.; WANEK, W. Direct measurement of the *in situ* decomposition of microbial-derived soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 141, 2020.
- KARI, A.; NAGYMÁTÉ, Z.; ROMSICS, C.; VAJNA, B.; KUTASI, J.; PUSPÁN, I.; KÁRPÁTI, É.; KOVÁCS, R.; MÁRIALIGETI, K. Monitoring of soil microbial

- inoculants and their impact on maize (*Zea mays* L.) rhizosphere using T-RFLP molecular fingerprint method. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 233-244, 2019.
- KLINDWORTH, A.; PRUESSE, E.; SCHWEER, T.; PEPLIES, J.; QUAST, C.; HORN, M. Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. **Nucleic Acids Research** **14**, 2013.
- KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, p.391-396, 1999.
- KURAMAE, E. E.; YERGEAU, E.; WONG, L. C.; PIJL, A. S.; VEEN, J. A. V.; KOWALCHUK, G. A. Soil characteristics more strongly influence soil bacterial communities than land-use type. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 79, p. 12-24, 2012.
- LI, X. Z.; RUI, J. P.; MAO, Y. J.; YANNARELL, A.; MACKIE, R. Dynamics of the bacterial community structure in the rhizosphere of a maize cultivar. **Soil Biology and Biochemistry** **68**: p. 392–401, 2014.
- LIU, L.; XU, M.; ALI, M. E.; ZHANG, W.; DUAN, Y.; LI, D. Factors affecting soil microbial biomass and functional diversity with the application of organic amendments in three contrasting cropland soils during a field experiment. **Plos One**, 2018.
- MARTINO, H. S. D.; CARDOSO, L. de M.; MORAES, É. A. SANT'ANA, H. M.; QUEIROZ, V. A. V. Por que Utilizar o Sorgo na Alimentação Humana?. **Embrapa Milho e Sorgo**. Sete Lagoas- MG, p. 95-114, 2014.
- MENEZES, C. B.; FERNANDES, E. A.; PARRELLA, R. A. C.; SCHAFFERT, R. E.; RODRIGUES, J. A. S. Melhoramento Genético de Sorgo. **Embrapa Milho e Sorgo**, ed. 1, p. 1-547, 2021.
- MIETHLING, R.; WIELAND, G.; BACKHAUS, H.; TEBBE, C.C. Variation of microbial rhizosphere communities in response to crop species, soil origin, and inoculation with *Sinorhizobium meliloti* L33. **Microbial Ecology**, p. 43-56, 2000.
- MOSIMANN, C.; OBERHÄNSLI, T.; ZIEGLER, D.; NASSAL, D.; KANDELER, E.; BOLLER, T.; MÄDER, P.; THONAR, C. Tracing of Two *Pseudomonas* Strains in the Root and Rhizoplane of Maize, as Related

to Their Plant Growth-Promoting Effect in Contrasting Soils. **Frontiers Microbiology**, v. 7, p. 2150, 2017.

NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. **UFV**: Viçosa, 1999

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F. et al. Fertilidade do Solo. Viçosa, MG; **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p.471-550, 2007.

NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. J. Phosphorus distribution in soil as affected by cropping systems and phosphate fertilization management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, 2011.

OLIVEIRA, C.; SHAKIBA, E.; NORTH, D.; MCGRAW, M.; BALLARD, E.; BARRETT-D'AMICO, M.; GLAZKO, G.; RAHMATALLAH, Y. 16S rRNA Gene-Based Metagenomic Analysis of Rhizosphere Soil Bacteria in Arkansas Rice Crop Fields. **Agronomy**, p. 1-13, 2022.

OLIVEIRA, L. C. A.; CARNEIRO, M. A.; LITTER, F. A.; CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; CAIOINE, G. Frações do fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1-16, 2021.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; SANTOS, F. C. dos; PINTO JUNIOR, A. S.; ALVES, V. M. C. Viabilidade Técnica e Econômica do BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas Culturas de Milho e Soja. **Embrapa Milho e Sorgo**, ed. 1, p. 1-21. 2020a.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JUNIOR, R. Recomendação agronômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas - MG. **Circular Técnica**, p.1-18, 2020b. OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; COTA, L.V.; MARRIEL, I. E.; ALVES, V. M. C.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M.; SANTOS, F. C.; SOUZA, F. F.; LANDAU, E. C.; PINTO JUNIOR, A. S.; LANA, U. G. Validação da recomendação para uso do inoculante BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura de soja. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 1-19, 2021.

- PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEIS, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, p. 812-818, 2020.
- PEIFFER, J. A.; SPOR, A.; KOREN, O.; JIN, Z.; TRINGE, S.E.; DANGL, E.E.; LEY, B.R. Diversity and Heritability of the Maize Rhizosphere Microbiome under Field Conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **110**, p.6548– 6553, 2013.
- QUEIROZ, A. T. S.; OLIVEIRA, B. C. Ação de microrganismos promotores do crescimento de plantas: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Psipro**, v. 2, n. 5, p. 98-112, 2023.
- QUEIROZ, V. A. V.; MORAES, É. A.; CHAEFFERT, R. E.; MOREIRA, A. V. Potencial Funcional e Tecnologia de Processamentos do Sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) MOENCH], Para Alimentação Humana. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 33, p. 180-195, 2011.
- RIBEIRO, V. P.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G. P.; COELHO, A. M.; MARRIEL, I. E.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A. Co-inoculation With Tropical Strains of *Azospirillum* and *Bacillus* Is More Efficient Than Single Inoculation for Improving Plant Growth and Nutrient Uptake in Maize. **Research Square**, p. 1-16, 2021.
- RICHARD, E.; ZACHARY, W.; STEPHEN KRESOVICH. Genetic and genomic resources of sorghum to connect genotype with phenotype in constrating environments. **Special Issue: Genome to Phenome**. v. 97, p. 19-39, 2019.
- SANTOS, F. G.; RODRIGUES, J. V. S.; SHAFFERT, R. E.; CASELA, C. R.; FERREIRA, A. S.; PITA, G. V. E. Híbrido de Sorgo Granífero BRS 310. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, p. 1-4, 2004.
- SANTOS, M. S.; RODRIGUES, T. F.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. The Challenge of Combining High Yields with Environmentally Friendly Bioproducts: A Review on the Compatibility of Pesticides with Microbial Inoculants. **Agronomy**, v. 11, p. 1-20, 2021.
- SAGHAFI, D.; DELANGIZ, N.; LAJAYER, B. A.; GHORBANPOUR, M. An overview on improvement of crop productivity in saline soils by halotolerant and halophilic PGPRs. **3 Biotech** **9**, v. 261, 2019.

- SARKAR, A.; DAS, P. Pedogeomorphology of the Plateau Fringe Region of Biharinath Hill, Bankura District of West Bengal and Its Influence on Landuse and Landcover. **International Journal of Research and Analytical Reviews**, v.5, p.488-501, 2018.
- SCHALLMACH, E.; MINZ, D.; JURKEVITCH, E. Culture-independent detection of changes in root-associated bacterial populations of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) following nitrogen depletion. **Microbial Ecology**, p.309-316, 2000.
- SESSITSCH, A.; WEILHARTER, A.; GERZABEK, M. H.; KIRCHMANN, H.; KANDELER, E. Microbial Population Structures in Soil Particle Size Fractions of a Long-Term Fertilizer Field Experiment. **Microbial Ecology**, v. 67, p. 4215-4224, 2020.
- SILVIA, U. C.; CUADROS-ORELLANA, S.; SILVA, D. R. C.; FREITAS-JÚNIOR, L. F.; FERNANDES, A. C.; LEITE, L. R.; OLIVEIRA, C. A.; DOS SANTOS, V. L. Genomic and Phenotypic Insights Into the Pontetial of Rock Phospate Solubilizing Bacteria to Promote Millet Growth in vivo. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 1-17, 2021a.
- SILVIA, L. D.; PECCHI, L. H. P.; BASTOS, F. G.; VALENTINO, F. L.; RIOYEI, H. A.; CASTRO, V. D. Importância em se conhecer o tipo de solo e as particularidades da adubação em áreas de cerrado. **SIFLOR – Cerrado V. II**, p. 30-43, 2021b.
- SINGH, D.; GHOSH, P.; KUMAR, J.; KUMAR, A. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPRs): Functions and Benefits. **Microbial Interventions in Agriculture and Environment** , p. 205-227, 2019.
- SOUSA, D.M.G., REIN, T.A. & LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de Cerrado. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., Brasília, 2008. **Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais: anais. Planaltina**, Embrapa Cerrados, 2008.
- TARDIN, F. D.; FILHO, J. E. A.; OLIVEIRA, C. M.; LEITE, E. P.; MENEZES, C. B.; MAGALHÃES, P. C.; RODRIGUES, J. A. S.; SHAFFERT, R. E. Avaliação agronômica de híbridos de sorgo granífero cultivados sob irrigação e

- estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n.2, p. 102-117, 2013.
- TIQUIA, S. M. Microbial community dynamics in manure composts based on 16S and 18S rDNA T-RFLP profiles. **Environmental Science & Technology**, p. 1101-13, 2005.
- TOJU, H.; TANABE, A. S.; YAMAMOTO, S.; SATO, H. High-coverage ITS primers for the DNA-based identification of ascomycetes and basidiomycetes in environmental samples. **Plos One** 7, 2012.
- TRABELSI, D.; CHERNI, A.; ZINEB, A. B.; DHANE, S. F.; MHAMDI, R. Fertilization of *Phaseolus vulgaris* with the Tunisian rock phosphate affects richness and structure of rhizosphere bacterial communities. **Applied Soil Ecology**, 1–8, 2017.
- VASCONCELOS, M. J. V.; FIGUEIREDO, J. E. F.; RAGHOTHAMA, K. G.; SOUZA, I. R. P. Transportadores de fosfato e outros mecanismos adaptativos de plantas cultivadas em solos deficientes em fósforo. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 1-34, 2021.
- VIEIRA, A. L. S.; DUARTE, G. B.; QUEIROZ, V. A. V.; CORREA, T. R.; SILVA, V. D. M.; ARAUJO, R. L. B.; GARCIA, M. A. V. T.; FANTE, C. A. Caracterização do amido isolado de diferentes cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.6, n.5, p. 24704-24718, 2020.
- VILLAMIZAR, G. A. NACKE, G. BOEHNING, M. HERZ, K. DANIEL, R. Functional Metagenomics Reveals an Overlooked Diversity and Novel Features of Soil-Derived Bacterial Phosphatases and Phytases. **Microorganisms**, p. 1-17, 2021.
- WANG, X.; JI, C.; SONG, X.; LIU, Z.; LIU, Y.; LI, H.; GAO, Q.; LI, C.; ZHENG, R.; HAN, X.; LIU, X. Biocontrol of Two Bacterial Inoculant Strains and Their Effects on the Rhizosphere Microbial Community of Field-Grown Wheat. **Hindawi**, v. 2021, p. 1-12, 2020.
- YANG, Y.; WANG, N.; GUO, X.; ZHANG, Y.; YE, B. Comparative analysis of bacterial community structure in the rhizosphere of maize by high-throughput pyrosequencing. **PLoS ONE** 12, 2017.
- ZHANG, W.; MO, Y.; YANG, J.; ZHOU, J.; LIN, Y.; ISABWE, A.; ZHANG, J.; GAO, X.; YU, Z. Genetic diversity pattern of microeukaryotic communities and its

relationship with the environment based on PCR-DGGE and T-RFLP techniques in Dongshan Bay, southeast China. **Continental Shelf Research**, p. 1-9, 2018.

ZHANG, J.; JIANG, F.; SHEN, Y.; ZHAN, Q.; BAI, B.; CHEN, W.; CHI, Y. Transcriptome analysis reveals candidate genes related to phosphorus starvation tolerance in sorghum, **BMC Plant Biology**, p. 1-18, 2019.

OBJETIVO GERAL

Avaliar a resposta de diferentes genótipos de sorgo a doses de inoculante contendo bactérias solubilizadoras de fosfato, em solos de texturas contrastantes, visando o aumento da eficiência produtiva da cultura.

Objetivos específicos

- Avaliar a morfologia radicular, peso seco e conteúdo de P de genótipos de sorgo inoculados com diferentes doses de inoculante contendo bactérias solubilizadoras de fosfato em solos arenoso e argiloso sob condição controlada.
- Investigar os efeitos da inoculação de bactérias solubilizadoras de fosfato no desempenho agrônômico, na arquitetura radicular e comunidade microbiana da rizosfera de sorgo cultivado em campo com solo arenoso.

CAPÍTULO I

Inoculação de genótipos de sorgo com bactérias solubilizadoras de fosfato em solos de textura contrastante

INTRODUÇÃO

O sorgo é uma cultura amplamente adaptável a diversas condições climáticas, sendo uma das principais opções para a produção de grãos e forragem, especialmente em áreas onde o déficit hídrico apresenta risco para outras culturas (MENEZES et al., 2021). Utilizado tanto na alimentação humana quanto animal, o sorgo é empregado na produção de ração, forragem e combustível (HAO et al., 2021).

Os sistemas agrícolas dependem diretamente da aplicação contínua de fertilizantes químicos, incluindo o fósforo (P). O P é um dos principais constituintes estruturais de diversas biomoléculas envolvidas em vários processos bioquímicos das plantas, sendo exigido em grandes quantidades para seu crescimento e desenvolvimento (BATTINI et al., 2017). No entanto, a maior parte do P presente no solo não está disponível para as plantas (RAO, 2017).

Vários estudos mostram que o uso de inoculantes contendo bactérias solubilizadoras de fosfato aumenta significativamente a disponibilidade e absorção de P pelas plantas (DE SOUSA et al., 2020; OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020a). Dessa forma, o desenvolvimento de inoculantes à base de microrganismos solubilizadores de fosfato abre novas perspectivas para aumentar a produção e melhorar a fertilidade dos solos, além de ser uma excelente ferramenta para substituir parcialmente ou totalmente os fertilizantes sintéticos (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021).

Desenvolvido pela Embrapa Milho e Sorgo em parceria com a empresa Bioma, o bioinoculante bacteriano BiomaPhos® foi inicialmente indicado apenas para a cultura do milho. No entanto, devido aos bons resultados obtidos e visando à recomendação agrícola e expansão de seu uso, diversos experimentos foram realizados para avaliar sua eficiência na cultura da soja e cana-de-açúcar, resultando no registro do produto no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) para essas culturas em 2021 (CANÇADO et

al., 2021; OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021). Entretanto, para o sorgo, ainda não existem estudos que definam a dosagem ideal de BiomaPhos®.

Experimentos conduzidos pela Embrapa e pela empresa Bioma, juntamente com relatos de produtores que utilizaram o BiomaPhos®, indicam que a produtividade das diferentes culturas com o uso do inoculante varia conforme o local e o tipo de solo (CANÇADO et al., 2021; OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021, 2024). Diante disso, nossa hipótese é que a resposta do sorgo à inoculação com BiomaPhos® depende tanto da dose aplicada quanto das características do solo e do genótipo utilizado. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar diferentes doses do bioinoculante contendo as estirpes de *Bacillus* CNPMS B119 e CNPMS B2084 solubilizadoras de P, em dois genótipos de sorgo cultivados em solos arenoso e argiloso sob condições controladas.

MATERIAL E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO SISTEMA RADICULAR DE PLÂNTULAS DE SORGO CULTIVADAS EM SOLOS ARGILOSO E ARENOSO COM DIFERENTES DOSES DE BIOMAPHOS®, EM CASA DE VEGETAÇÃO

O experimento foi conduzido na casa de vegetação da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG. Foram utilizados dois genótipos de sorgo, BRS 332 e BRS 373, do programa de melhoramento de sorgo da Embrapa. O híbrido simples de sorgo granífero BRS 332 é conhecido por sua alta produtividade, boa sanidade foliar, resistência ao acamamento, uniformidade de lavoura e boa tolerância ao estresse hídrico. Este genótipo possui porte baixo, ciclo médio, panícula semiaberta, grãos vermelhos e ausência de tanino (EMBRAPA, 2009). O BRS 373, por sua vez, é um híbrido de sorgo granífero que também apresenta porte baixo, ausência de tanino, grãos vermelhos, ciclo superprecoce, alta produtividade e estabilidade. Esta cultivar destaca-se por sua alta uniformidade, resistência ao acamamento e boa tolerância ao alumínio (EMBRAPA, 2016). O BRS 310 é uma cultivar de sorgo granífero do tipo híbrido simples, de porte baixo, grãos vermelhos, ciclo de 120 dias e sem tanino. Além disso, é resistente ao acamamento, à Cercosporiose, e possui moderada resistência à antracnose, helmintosporiose e ferrugem (SANTOS, 2004).

As sementes de sorgo foram semeadas em tubetes de 63 x 190 mm (~0,9 kg de solo), contendo dois tipos de solo: (1) solo arenoso da Fazenda Trijunção, Jaborandi, BA e (2) solo argiloso da Fazenda da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento e cinco doses de BiomaPhos® (0, 50, 100, 200 e 500 mL ha⁻¹ por 200.000 sementes). A inoculação foi feita via semente (OLIVEIRA et al., 2020). Trinta dias antes do plantio, foi realizada a correção da acidez do solo e a adubação (com exceção de fosfato), baseadas na análise química do solo (Tabela 1) e nas necessidades da cultura. A calagem foi calculada pelo método da neutralização do alumínio e elevação dos teores de cálcio e magnésio (ALVAREZ et al., 1999). Após a incubação do solo com adubos e corretivos, foi aplicado fertilizante fosfatado (Tabela 2) e, em seguida, semeadas as sementes. Dez dias após a semeadura, foi realizada uma aplicação de ureia a 5%. Os tubetes foram irrigados conforme necessário para manter a capacidade de campo.

Tabela 1. Análise dos solos arenoso e argiloso utilizado no experimento em casa de vegetação antes da instalação do ensaio.

Característica	Arenoso	Argiloso	Característica	Arenoso	Argiloso
pH (água)	6,6	5,3	Zn mg dm ⁻³	0,5	2,2
pH (CaCl ₂)	6	4,9	SB cmol _c dm ⁻³	4,16	5,66
P meq ⁻¹ mg dm ⁻³	39	12,7	T cmol _c dm ⁻³	5,66	9,15
K mg dm ⁻³	61,3	133,2	V%	73,6	69,5
S mg dm ⁻³	32,94	16,61	m%	0	2
K cmol _c dm ⁻³	0,16	0,34	Ca Mg ⁻¹	2,6	3
Ca cmol _c dm ⁻³	2,9	4,51	Ca K ⁻¹	18,5	13,2
Mg cmol _c dm ⁻³	1,1	1,51	Mg K ⁻¹	7	4
Al cmol _c dm ⁻³	0	0,13	Ca+Mg/K	25,5	17,6
H+Al cmol _c dm ⁻³	1,5	2,8	Ca/T%	51,3	49,2
MO dag x10g kg ⁻¹	1,22	3,62	Mg/T%	19,5	16,5
CO dag x10gkg ⁻¹	0,71	2,1	K/T%	2,8	3,7
B mg dm ⁻³	0,55	0,47	H+Al/T%	26,5	30,6
Cu mg dm ⁻³	0,1	0,9	Ca+Mg/T%	70,8	65,7
Fe mg dm ⁻³	11	25	Ca+Mg+Na+K/T%	73,6	69,5
Mn mg dm ⁻³	1	5,6			

** pH (água): pH água; pH (CaCl₂): pH cloreto de cálcio; P meh.⁻¹ mg dm⁻³: solução extratora Mehlich por micrograma por decímetro cúbico; K mg dm⁻³: potássio por micrograma por decímetro cúbico; S mg dm⁻³: enxofre por micrograma por decímetro cúbico; K cmol_c dm⁻³: potássio por centímol por decímetro cúbico; Ca cmol_c dm⁻³: cálcio por centímol por decímetro cúbico; Mg cmol_c dm⁻³: magnésio por centímol por decímetro cúbico; Al cmol_c dm⁻³: alumínio por centímol por decímetro cúbico; H+Al cmol_c dm⁻³: relação entre hidrogênio e alumínio por centímol por decímetro cúbico; MO dag x10g kg⁻¹: matéria orgânica por decagrama por quilo; CO dag x10gkg⁻¹: composto orgânico por decagrama por quilo; B mg dm⁻³: boro por micrograma por decímetro cúbico; Cu mg dm⁻³: cobre por micrograma por decímetro cúbico; Fe mg dm⁻³: ferro por micrograma por decímetro cúbico; Mn mg dm⁻³: manganês por micrograma por decímetro cúbico; Zn mg dm⁻³: zinco por micrograma por decímetro cúbico; SB cmol_c dm⁻³: soma de bases trocáveis por centímol por decímetro cúbico; T cmol_c dm⁻³: capacidade de troca de cátions por centímol por decímetro cúbico; V%: percentagem de saturação por bases; m%: saturação por alumínio; Ca/Mg: relação entre cálcio e magnésio; Ca/K: relação entre cálcio e potássio; Mg/K: relação entre magnésio e potássio; Ca+Mg/K: relação de cálcio + magnésio por potássio trocável no solo; Ca/T%: percentagem de cálcio trocável; Mg/T%: percentagem de magnésio trocável; K/T%: percentagem de potássio trocável; H+Al/T%: percentagem da relação entre hidrogênio e alumínio trocável; Ca+Mg/T%: percentagem da relação entre cálcio + magnésio trocável; Ca+Mg+Na+K/T%: percentagem da relação entre cálcio + magnésio + sódio + potássio trocável.

Tabela 2. Quantidade de fertilizantes aplicados para preparação dos solos arenoso e argiloso em casa de vegetação.

Dose	Solo arenoso	Solo argiloso
P ₂ O ₅	50 % dose	25% dose
P ₂ O ⁵	45 kg ha ⁻¹ (4,5 g 200 kg ⁻¹ solo) SS = 25 g	100 kg ha ⁻¹ (10 g 200 kg ⁻¹ solo) SS = 117 g
N	120 kg ha ⁻¹ (12 g 200 kg ⁻¹ solo) ureia = 27 g	90 kg ha ⁻¹ (9 g 200 kg ⁻¹ solo) ureia = 21 g
K ₂ O	120 kg ha ⁻¹ (12 g 200 kg ⁻¹ solo) KCl = 21 g	120 kg ha ⁻¹ (12 g 200 kg ⁻¹ solo) KCl = 21 g
FTE BR 12	100 kg/ha (10 g FTE/200 kg ⁻¹ solo) FTE BR12 = 10 g	100 kg/ha (10 g FTE/200 kg ⁻¹ solo) FTE BR12 = 10 g

Quarenta dias após o plantio, a parte aérea das plantas foi separada do sistema radicular. As raízes das plantas foram lavadas com um jato de água até que ficassem livres de solo. Para evitar perdas de material vegetal, a lavagem foi realizada utilizando peneiras de 10 e 60 Mesh. O sistema radicular foi escaneado com um escâner profissional Epson XL 10000, equipado com unidade de luz adicional (TPU), com resolução de 400 dpi. As imagens foram analisadas utilizando o software WinRhizo v. 4.0 (Regent Systems, Quebec, Canadá), sendo quantificadas diversas características radiculares, como comprimento total (cm) e comprimento radicular dividido nos seguintes diâmetros: 0-1 mm, 1-2 mm e maior que 4,5 mm (DE SOUSA et al., 2012).

Para determinar o peso seco, as raízes e a parte aérea das plântulas foram mantidas em estufa a 65 °C até atingirem peso constante. Após a determinação do peso seco, as amostras foram moídas e enviadas para a determinação da concentração de macronutrientes (N, P e K) na parte aérea e nas raízes, além do P-resina (método de extração do P presente no solo), no Laboratório Brasileiro de Análises Ambientais e Agrícolas (LABRAS) em Monte Carmelo – MG.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi feita a análise de variância (ANOVA) das características obtidas do genótipo BRS 332 e BRS 373 e as diferenças obtidas entre as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste LSD a um nível de significância de 5% com software estatístico R versão 4.1.2 usando o pacote Agricolae (DE MENDIBURU, 2019).

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada para identificar as principais características que explicam a maior parte da variação entre os genótipos estudados. A PCA foi baseada na matriz de correlação de Pearson, além de A PERMANOVA bidirecional com 9999 permutações foi usada para testar a ordenação do PCA, $p \leq 0,05$, conforme descrito por CAMPOLINO et al. (2022).

RESULTADOS

A análise de variância das características morfológicas do sistema radicular, peso seco e conteúdo de nutrientes dos genótipos BRS 332 e BRS 373 de sorgo crescidos em diferentes doses de Bioinoculante mostrou que há variabilidade entre os genótipos e entre as doses de Bioinoculante (Tabelas 3 e 4). Para genótipo foram encontradas diferenças significativas comprimento radicular total, diâmetro radicular médio, área de superfície de raízes com diâmetro entre 0 e 1 mm e peso seco da parte aérea. Para Bioinoculante e interação solo e Bioinoculante foram encontradas diferenças para comprimento radicular total e área de superfície de raízes com diâmetro entre 0 e 1 mm. Para a interação genótipo e solo houve diferença significativa para todas as

características. Para tipo de solo, interação solo e Bioinoculante interação tripla não houve diferenças significativas (Tabela 3). Já para genótipo, em relação aos nutrientes, foi significativa a diferença para K da parte aérea e N P K de raiz, para Bioinoculante N da parte aérea e K de raiz, para interação genótipo e solo foi significativamente diferente N da parte aérea e N e K de raiz, já para interação solo e Bioinoculante foi diferente significativamente K de raiz. Para solo, interação solo e Bioinoculante e interação tripla não houve diferença significativa (Tabela 4).

Tabela 3. Análise de variância para as médias das características comprimento radicular total (CR), diâmetro radicular médio (D), área de superfície de raízes com 0 a 1 mm (AS1) e 1 a 2 mm (AS2) e peso seco da parte aérea (PSPA), raiz (PSR) e total (PST) de sorgo inoculado com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato crescidos em solos de textura contrastante em casa de vegetação.

Características	GL	Quadrado Médio						
		CR	D	AS1	AS2	PSPA	PSR	PST
Genótipo	1	6483292 ***	0,042 **	31806 ***	642	0,09 .	0,001	0,0739
Solo	1	178237	0,007	606	216	0,00	0,005	0,0776 .
Bioinoculante	4	370101 .	0,001	2695 *	366	0,06	0,006	0,6041
Genótipo x Solo	1	1227528 **	0,029 **	7634 **	4327 **	0,39 ***	0,038 .	0,0313 *
Genótipo x Bioinoculante	4	408593 .	0,0006	1711 .	209	0,01	0,005	0,8281
Solo x Bioinoculante	4	58252	0,0032	347	145	0,007	0,008	0,0179 *
Genótipo x Solo x Bioinoculante	4	90735	0,007	458	190	0,033	0,013	0,1672
Erro	50	166098	0,004	823	391	0,03	0,01	0,0723 .
C.V.	16,82	15,29	12,95	14,28	27,28	26,02	42,96	26,97

Significância do teste LSD: 0 '***' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1

Tabela 4. Análise de variância para concentração de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) da parte aérea (N_PA, P_PA e K_PA) e raiz (N_R, P_R e K_R) e P_resina de solo rizosférico dos genótipos BRS 332 e BRS 373 de sorgo inoculados com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato e cultivados em solos de textura contrastante em casa de vegetação.

	GL	Quadrado médio						
		N_PA	P_PA	K_PA	N_RAIZ	P_RAIZ	K_RAIZ	P_RESINA
Genótipo	1	41,98	0,002	107,67 *	49,16 *	0,49 *	189,28 ***	521,80
Solo	1	51,32	0,14	3,37	1,55	0,004	1,19	9,90
Bioinoculante	4	96,64 .	0,39	14,11	20,05	0,01	5,52 .	354,30
=Genótipo x Solo	1	250,96 *	0,17	47,05	78,25 **	0,08	17,63 *	537,80
Genótipo x Bioinoculante	4	47,37	0,26	18,82	11,18	0,18	9,79 **	704,80
Solo x Bioinoculante	4	36,57	0,18	2,78	6,95	0,09	4,70	462,70
Genótipo x Solo x Bioinoculante	4	34,22	0,21	23,61	13,18	0,16	4,79	837,90
Erro	50	39,28	0,23	17,80	10,77	0,12	2,57	458,70
C.V.	16,82	32,85	39,71	27,18	24,72	46,97	30,72	57,57

Significância do teste LSD: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1

Para o genótipo BRS332 (Tabela 5) foram encontradas diferenças significativas no aumento do sistema radicular, peso seco das plântulas e conteúdo de nutrientes da parte aérea e raiz, em ambos os solos. O comprimento radicular total, diâmetro radicular médio, área de superfície de raízes com diâmetro entre 0 a 1 mm e 1 a 2 mm (SA1 e SA2), apresentaram resultados significativos para a dose 100 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo arenoso (Tabela 5). Para peso seco da parte aérea, raiz e total foram encontradas diferenças significativas na dose 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso (Tabela 5). Quando comparada as doses entre si, para comprimento radicular total foram encontradas diferenças significativas nas doses 200 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso. Para diâmetro radicular médio, peso seco da parte aérea, raiz e total foram encontradas diferenças significativas na dose 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso (Tabela 5). No genótipo BRS373 (Tabela 6) a inoculação contribuiu de forma significativa na área de superfície de 0 a 1 mm (SA1) na dose 100 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso (Tabela 6). Quando

comparadas as doses entre si, para área de superfície de 1 a 2 mm (SA2) e peso seco da parte aérea (PSPA) em solo argiloso foi encontrada diferença significativa na dose 500 mL ha⁻¹ de Bioinoculante (Tabela 6).

Em relação aos macronutrientes presentes na raiz e parte aérea do genótipo BRS332, para nitrogênio parte aérea, fósforo parte aérea, nitrogênio raiz e potássio raiz, foi encontrada diferença significativa com a inoculação 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso (Tabela 7). Quando comparadas as doses entre si, para nitrogênio parte aérea foi encontrada diferença significativa na dose 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso. Para fósforo raiz foi encontrada diferença significativa na dose 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso, e 500 mL ha⁻¹ em solo arenoso. Para potássio parte aérea foi encontrada diferença significativa na dose 500 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo arenoso (Tabela 7). Para o genótipo BRS373 foi encontrada diferença significativa para fósforo raiz com a inoculação 200 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo argiloso, e para potássio raiz (K_RAIZ) com a inoculação 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante em solo arenoso. Quando comparadas as doses entre si não foi encontrada nenhuma diferença significativa (Tabela 8).

Foi possível observar um maior comprimento radicular e peso seco (Tabela 5) e conteúdo de nutrientes (Tabela 7) nas plântulas do genótipo BRS332 crescidas em solo argiloso do que arenoso, no entanto para o genótipo BRS373 não foi esta observada diferença (Tabela 6 e 8).

Tabela 5. Média das características de morfologia radicular e peso seco do genótipo BRS 332 de sorgo inoculados com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato e cultivado em solos de texturas contrastantes em casa de vegetação.

Bionoculante	CR (cm)		D (mm)		SA1 (cm ²)		SA2 (cm ²)		PSPA (g)		PSR (g)		PST (g)	
	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso
0	2505,68 ^{Aab}	2662,64 ^{Aa}	4,25 ^{Aab}	5,14 ^{Aa}	185,93 ^{Aab}	196,72 ^{Aa}	64,84 ^{Aab}	81,03 ^{Aa}	0,62 ^{Aa}	0,63 ^{Abc}	0,20 ^{Aa}	0,27 ^{Aabc}	0,82 ^{Aa}	0,90 ^{Aabc}
50	2020,21 ^{Abc}	2480,77 ^{Aa}	2,56 ^{Bb}	6,79 ^{Aa}	149,45 ^{Bc}	187,39 ^{Aa}	40,20 ^{Bb}	83,45 ^{Aa}	0,52 ^{Ba}	0,88 ^{Aa}	0,15 ^{Ba}	0,32 ^{Aa}	0,67 ^{Ba}	1,2 ^{Aa}
100	2557,33 ^{Aa}	2499,93 ^{Aa}	5,03 ^{Aa}	5,83 ^{Aa}	202,14 ^{Aa}	195,83 ^{Aa}	74,64 ^{Aa}	81,62 ^{Aa}	0,54 ^{Aa}	0,76 ^{Aab}	0,20 ^{Aa}	0,29 ^{Aab}	0,74 ^{Aa}	1,05 ^{Aab}
200	1914,28 ^{Bc}	2411,03 ^{Aa}	3,87 ^{Aab}	5,06 ^{Aa}	144,96 ^{Bc}	179,94 ^{Aa}	59,94 ^{Aab}	67,98 ^{Aa}	0,55 ^{Aa}	0,64 ^{Abc}	0,19 ^{Aa}	0,24 ^{Abc}	0,74 ^{Aa}	0,88 ^{Abc}
500	2153,74 ^{Babc}	2631,15 ^{Aa}	4,12 ^{Aab}	5,14 ^{Aa}	166,55 ^{Bbc}	202,71 ^{Aa}	63,02 ^{Aab}	77,09 ^{Aa}	0,53 ^{Aa}	0,56 ^{Ac}	0,33 ^{Aa}	0,22 ^{Ac}	0,86 ^{Aa}	0,78 ^{Ac}

*Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD de média ($p < 0,05$). ¹ Doses de Bioinoculante (mL ha⁻¹ por 200.000 sementes). Comprimento total de raiz (CR), diâmetro médio de raiz (D), área de superfície de 0 a 1 e 1 a 2 mm (SA1 e SA2) e peso seco da parte aérea (PSA), raiz (PSR) e total (PST)

Tabela 6. Média das características de morfologia radicular e peso seco do genótipo BRS 373 de sorgo inoculados com diferentes doses bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato e cultivado em solos de texturas contrastantes em casa de vegetação.

Bioinoculante	CR (cm)		D (mm)		SA1 (cm ²)		SA2 (cm ²)		PSPA (g)		PSR (g)		PST (g)	
	Arenoso	Arenoso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso
0	2860,09 ^{Aa}	2860,09 ^{Aa}	4,95 ^{Aa}	4,21 ^{Aa}	220,21 ^{Aa}	206,10 ^{Aab}	78,11 ^{Aa}	68,55 ^{Aa}	0,62 ^{Aa}	0,59 ^{Aa}	0,25 ^{Aa}	0,23 ^{Aa}	0,87 ^{Aa}	0,82 ^{Aa}
50	2734,28 ^{Aa}	2734,28 ^{Aa}	4,93 ^{Aa}	4,06 ^{Aa}	208,19 ^{Aa}	195,58 ^{Ab}	77,82 ^{Aa}	65,34 ^{Aa}	0,86 ^{Aa}	0,64 ^{Aa}	0,26 ^{Aa}	0,20 ^{Aa}	1,12 ^{Aa}	0,84 ^{Aa}
100	3337,53 ^{Aa}	3337,53 ^{Aa}	6,30 ^{Aa}	5,28 ^{Aa}	252,90 ^{Aa}	243,53 ^{Aa}	87,65 ^{Aa}	78,71 ^{Aa}	0,84 ^{Aa}	0,66 ^{Aa}	0,31 ^{Aa}	0,27 ^{Aa}	1,15 ^{Aa}	0,93 ^{Aa}
200	3238,64 ^{Aa}	3238,64 ^{Aa}	5,44 ^{Aa}	4,52 ^{Aa}	243,86 ^{Aa}	221,76 ^{Aab}	86,58 ^{Aa}	70,44 ^{Aa}	0,78 ^{Aa}	0,63 ^{Aa}	0,28 ^{Aa}	0,22 ^{Aa}	1,06 ^{Aa}	0,93 ^{Aa}
500	3073,82 ^{Aa}	3073,82 ^{Aa}	4,79 ^{Aa}	4,25 ^{Aa}	219,44 ^{Aa}	208,29 ^{Aab}	75,91 ^{Aa}	63,94 ^{Ba}	0,76 ^{Aa}	0,59 ^{Ba}	0,25 ^{Aa}	0,23 ^{Aa}	1,00 ^{Aa}	0,81 ^{Aa}

*Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD de média ($p < 0,05$). ¹ Doses de Bioinoculante (mL ha⁻¹ por 200.000 sementes). Comprimento total de raiz (CR), diâmetro médio de raiz (D), área de superfície de 0 a 1 e 1 a 2 mm (SA1 e SA2) e peso seco da parte aérea (PSA), raiz (PSR) e total (PST)

Tabela 7. Média dos valores de macronutrientes (N P K) na raiz e parte aérea e P no solo (P_resina) do genótipo de sorgo BRS 332 inoculado com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato cultivado em solos arenoso e argiloso por 40 dias.

Bioinoculante	N_PA (g kg ⁻¹)		P_PA (g kg ⁻¹)		K_PA (g kg ⁻¹)		N_RAIZ (g kg ⁻¹)		P_RAIZ (g kg ⁻¹)		K_RAIZ (g kg ⁻¹)		P-RESINA (mg dm ⁻³)	
	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso
0	15,67 ^{Aa*}	17,74 ^{Ab}	1,21 ^{Aa}	1,05 ^{Aab}	16,50 ^{Aa}	13,78 ^{Aa}	10,71 ^{Aa}	12,55 ^{Abc}	0,94 ^{Aa}	0,83 ^{Aa}	9,56 ^{Aa}	7,01 ^{Aab}	31,67 ^{Aa}	44,05 ^{Aa}
50	16,56 ^{Ba}	31,59 ^{Aa}	1,19 ^{Aa}	1,55 ^{Aa}	11,72 ^{Aa}	17,33 ^{Aa}	12,09 ^{Aa}	17,35 ^{Aa}	0,66 ^{Ba}	1,03 ^{Aa}	7,21 ^{Aa}	8,31 ^{Aa}	56,40 ^{Aa}	34,78 ^{Aa}
100	18,17 ^{Ba}	24,89 ^{Aab}	1,30 ^{Aa}	1,39 ^{Aab}	12,78 ^{Ba}	17,56 ^{Aa}	10,42 ^{Ba}	15,16 ^{Aab}	0,68 ^{Aa}	1,00 ^{Aa}	7,39 ^{Aa}	7,29 ^{Aab}	22,67 ^{Aa}	54,95 ^{Aa}
200	18,88 ^{Aa}	19,77 ^{Ab}	1,06 ^{Aa}	1,28 ^{Aab}	14,25 ^{Aa}	14,40 ^{Aa}	11,57 ^{Aa}	12,19 ^{Abc}	0,79 ^{Aa}	0,87 ^{Aa}	7,24 ^{Aa}	5,48 ^{Ab}	22,60 ^{Aa}	30,33 ^{Aa}
500	16,50 ^{Aa}	17,15 ^{Ab}	1,42 ^{Aa}	0,79 ^{Ab}	12,38 ^{Aa}	13,02 ^{Aa}	11,77 ^{Aa}	10,45 ^{Ac}	0,83 ^{Aa}	0,41 ^{Bb}	6,51 ^{Aa}	3,13 ^{Bc}	46,15 ^{Aa}	46,70 ^{Aa}

*Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD de média (p<0,05). ¹Doses de Bioinoculante (mL ha⁻¹ por 200.000 sementes). ²Nitrogênio parte aérea (N_PA), fósforo parte aérea (P_PA), potássio parte aérea (K_PA), nitrogênio raiz (N_RAIZ), fósforo raiz (P_RAIZ), potássio raiz (K_RAIZ) e fósforo resina (P_RESINA).

Tabela 8. Média dos valores de macronutrientes (N P K) na raiz e parte aérea e P no solo (P-resina) do genótipo de sorgo BRS 373 inoculado com diferentes doses de Bioinoculante cultivado em solo arenoso e argiloso por 40 dias.

Bioinoculante	N_PA (g kg ⁻¹)		P_PA (g kg ⁻¹)		K_PA (g kg ⁻¹)		N_RAIZ (g kg ⁻¹)		P_RAIZ (g kg ⁻¹)		K_RAIZ (g kg ⁻¹)		P-RESINA (mg dm ⁻³)	
	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso	Argiloso
0	13,38 ^{Aa}	14,87 ^{Aa}	0,84 ^{Aa}	0,76 ^{Aa}	13,65 ^{Aa}	14,17 ^{Aa}	11,68 ^{Aa}	12,25 ^{Aa}	0,39 ^{Aa}	0,38 ^{Ab}	3,10 ^{Aab}	4,22 ^{Aa}	64,58 ^{Aa}	32,23 ^{Aa}
50	20,13 ^{Aa}	17,92 ^{Aa}	1,52 ^{Aa}	1,20 ^{Aa}	18,99 ^{Aa}	14,35 ^{Aa}	15,60 ^{Aa}	14,30 ^{Aa}	0,75 ^{Aa}	0,62 ^{Aab}	3,60 ^{Aa}	3,18 ^{Aa}	40,23 ^{Aab}	29,70 ^{Aa}
100	20,47 ^{Aa}	16,91 ^{Aa}	1,38 ^{Aa}	0,89 ^{Aa}	19,44 ^{Aa}	16,71 ^{Aa}	16,17 ^{Aa}	10,99 ^{Aa}	0,77 ^{Aa}	0,45 ^{Aab}	3,40 ^{Aab}	4,04 ^{Aa}	32,80 ^{Ab}	20,17 ^{Aa}
200	19,43 ^{Aa}	19,58 ^{Aa}	1,40 ^{Aa}	1,45 ^{Aa}	16,87 ^{Aa}	17,63 ^{Aa}	16,13 ^{Aa}	14,04 ^{Aa}	0,75 ^{Aa}	0,88 ^{Aa}	1,84 ^{Ab}	4,88 ^{Aa}	27,48 ^{Ab}	46,57 ^{Aa}
500	24,54 ^{Aa}	16,99 ^{Ba}	1,45 ^{Aa}	1,28 ^{Aa}	18,08 ^{Aa}	17,90 ^{Aa}	15,38 ^{Aa}	13,69 ^{Aa}	0,78 ^{Aa}	0,66 ^{Aab}	4,88 ^{Aa}	3,80 ^{Aa}	17,73 ^{Ab}	27,70 ^{Aa}

*Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD de média ($p < 0,05$). ¹ Doses de Bioinoculante (mL ha⁻¹ por 200.000 sementes). ² Nitrogênio parte aérea (N_PA), fósforo parte aérea (P_PA), potássio parte aérea (KPA), nitrogênio raiz (N_RAIZ), fósforo raiz (P_RAIZ), potássio raiz (K_RAIZ) e fósforo resina (P_RESINA).

A análise de PCA permitiu visualizar a distribuição dos dois genótipos de sorgo com base nas características de morfologia radicular no solo arenoso e argiloso (Figura 1 e 2). No solo arenoso, o primeiro componente principal (CP1) explicou 48,7% enquanto o segundo componente principal (CP2) explicou 16,5% da variação (Tabela 9). Em solo arenoso, a maioria das características presentes no CP1 e CP2 apresentaram coeficientes e autovetores negativos, com exceção do comprimento total (cm) em CP1, área de superfície 2 (cm²), K-raiz em CP1, e N-PA, K-raiz e P-resina no CP2 (Tabela 9). A maior contribuição para o genótipo BRS332 foi o K na raiz, enquanto as outras variáveis contribuíram para o genótipo BR373. Já em solo argiloso, o primeiro componente principal (CP1) explicou 50,6% enquanto o segundo componente principal (CP2) explicou 22,8% da variação (Tabela 9). A maioria das características presentes no CP1 e CP2 apresentaram coeficientes e autovetores negativos, com exceção do comprimento total, AS2 e K-raiz em CP1 e em CP2, comprimento total, área de superfície, N-PA, K-PA, N-raiz, K-raiz em CP2 (Tabela 10). Nesse solo, o comprimento radicular total e área de superfície de raízes superfinais (0-1 mm) explicaram a variação do genótipo BRS373, enquanto as outras características explicaram o genótipo BRS332.

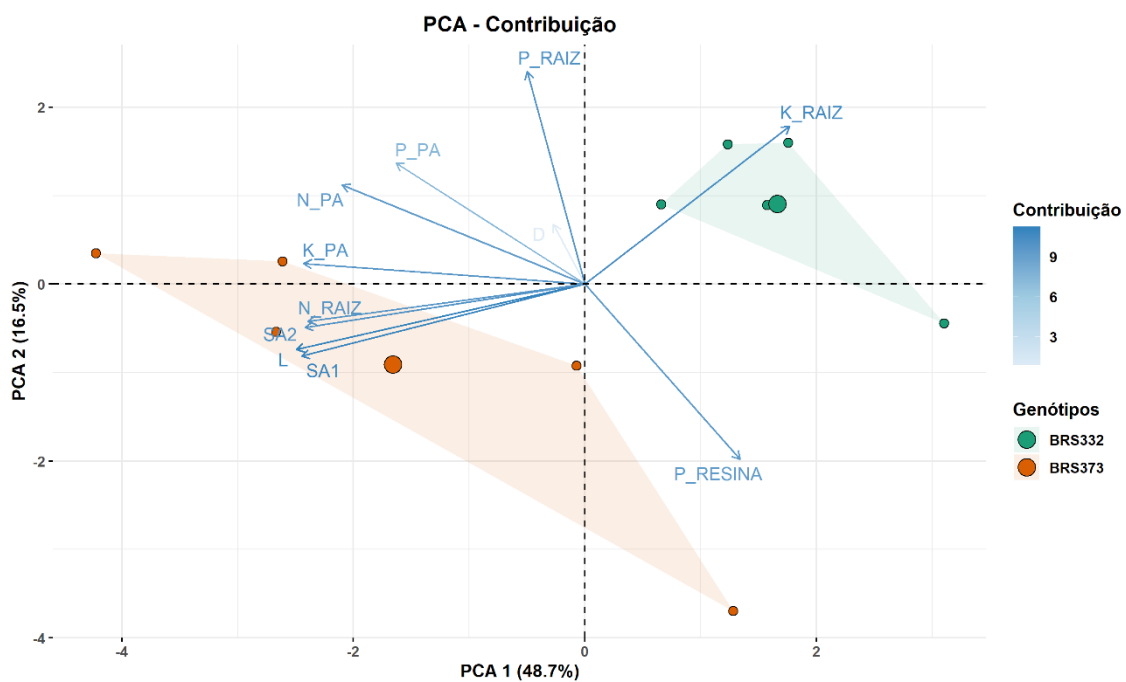


Figura 1. Análise de componentes principais para as características de morfologia radicular, peso seco e nutrientes dos genótipos BRS332 e BRS373 crescidos com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadores de fosfato em solo arenoso. ● Genótipo1: BRS332 e ● Genótipo2: BRS373.

Tabela 9. Análise de componentes principais em solo arenoso para as características morfológicas do sistema radicular (comprimento total, diâmetro médio e áreas de superfície) conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio na raiz e solo rizosférico.

Variáveis	CP1	CP2	Contribuição (%)
Comprimento total (cm)	5,002	-1,82	17,83
Diâmetro médio (cm ²)	-5,92	-1,36	2,69
Área de superfície 1 (cm ²)	-2,92	-6,64	17,93
Área de superfície 2 (cm ²)	1,38	-5,16	15,22
Nitrogênio - Parte Aérea (g kg ⁻¹)	-1,38	9,69	17,36
Fósforo - Parte Aérea (g kg ⁻¹)	-3,34	-2,38	16,66
Potássio - Parte Aérea (g kg ⁻¹)	-1,82	-7,29	14,36
Nitrogênio – Raiz (g kg ⁻¹)	-2,73	-4,84	16,61
Fósforo – Raiz (g kg ⁻¹)	-5,92	-1,36	32,44
Potássio – Raiz (g kg ⁻¹)	1,10	6,78	25,04
P-resina (mg dm ⁻³)	-4,02	1,62	25,84
Autovalor	20,57	12,76	
Variância acumulada	48,7 %	16,5 %	

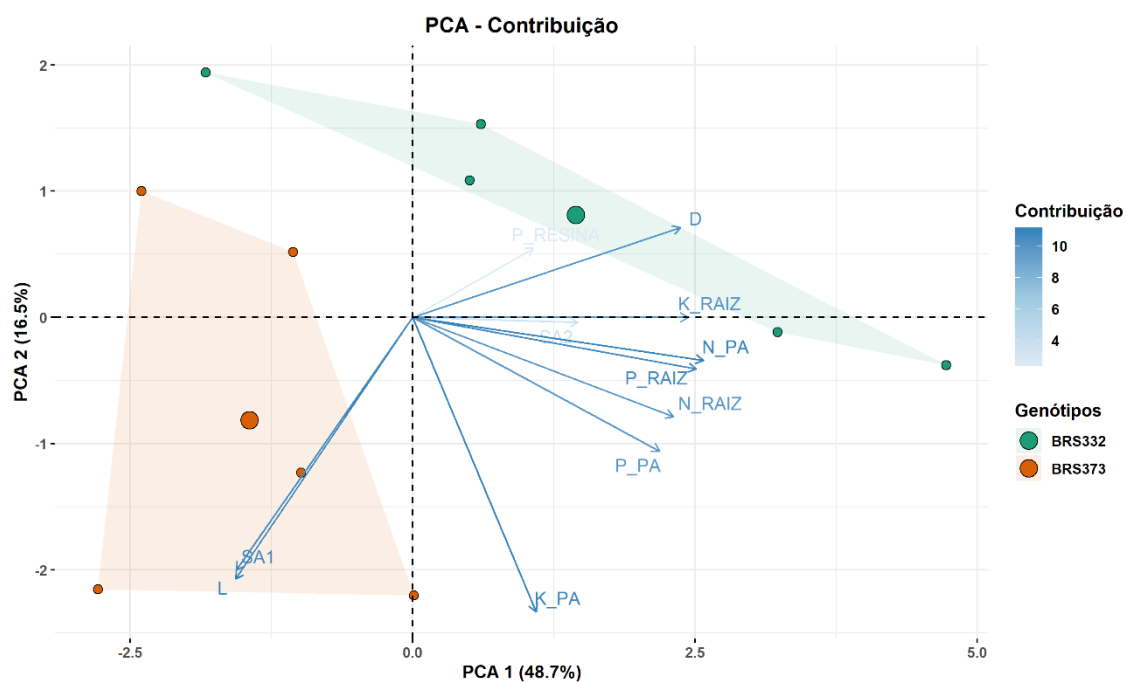


Figura 2. Análise de componentes principais para as características de morfologia radicular, peso seco e nutrientes dos genótipos BRS332 e BRS373 crescidos com diferentes doses de bioinoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato em solo argiloso. ● Genótipo1: BRS332 e ● Genótipo2: BRS373.

Tabela 10. Análise de componentes principais em solo argiloso para as características morfológicas do sistema radicular (comprimento total, diâmetro médio e áreas de superfície) conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio na raiz e solo rizosférico.

Variáveis	CP1	CP2	Contribuição (%)
Comprimento total (cm)	3,22	1,60	31,48
Diâmetro médio (cm ²)	-6,00	-9,27	15,85
Área de superfície 1 (cm ²)	-9,97	1,52	29,71
Área de superfície 2 (cm ²)	1,18	-4,99	4,88
Nitrogênio - Parte Aérea (g kg ⁻¹)	-9,42	1,27	15,76
Fósforo - Parte Aérea (g kg ⁻¹)	-3,00	-1,47	17,66
Potássio - Parte Aérea (g kg ⁻¹)	-2,50	1,02	35,54
Nitrogênio – Raiz (g kg ⁻¹)	-2,15	4,94	15,87
Fósforo – Raiz (g kg ⁻¹)	-5,50	-8,03	15,35
Potássio – Raiz (g kg ⁻¹)	1,02	4,48	22,0
P-Resina (mg dm ⁻³)	-2,12	-3,53	4,40
Autovalor	35,24	12,46	
Variância acumulada	50,60 %	22,83 %	

DISCUSSÃO

O inoculante microbiano não é universal para todos os sistemas, sendo sua eficácia afetada pelo tipo de planta e genótipo, tipo de solo e dentre outros fatores (ADESEMOYE, 2009). As bactérias encontradas no BiomaPhos® promovem o crescimento radicular (DE SOUSA et al., 2012; VELLOSO et al., 2020), e a densidade da massa radicular pode influenciar a estrutura e a função do solo (ERKTAN et al., 2016; YUE et al., 2021). Por isso, é importante entender a resposta de diferentes doses de Bioinoculante em solos de texturas contrastantes.

O genótipo BRS332 apresentou diferença em solo arenoso no comprimento radicular, diâmetro médio de raiz, área de superfície de 0 a 1 e 1 a 2 mm com a inoculação de 100 mL ha⁻¹. Em solo argiloso com a inoculação de 50 mL ha⁻¹ foram encontradas diferenças significativas para peso seco da parte aérea, peso seco da raiz, peso seco total, nitrogênio da parte aérea, fósforo da parte aérea, nitrogênio raiz e potássio raiz. Quando comparadas as doses de Bioinoculante entre si, em solo arenoso não foram encontradas diferenças significativas. Enquanto em solo argiloso foram encontradas diferenças significativas na dose 50 mL ha⁻¹ para peso diâmetro médio de raiz, área de superfície de 0 a 1 e 1 a 2 mm, peso seco da parte aérea, peso seco da raiz, peso seco total, nitrogênio parte aérea e fósforo raiz, na dose 100 mL foi encontrada diferença significativa em nitrogênio parte aérea, potássio raiz e nitrogênio raiz, enquanto na doses 200 mL ha⁻¹ e 500 mL ha⁻¹ foram encontradas diferenças significativas para comprimento radicular e área de superfície de 0 a 1 (Tabela 5 e 7). Para o genótipo BRS 373 foi encontrada diferença significativa em solo arenoso com a dose 500 mL ha⁻¹ em potássio raiz, enquanto em solo argiloso foi encontrada diferença significativa com a dose 100 mL ha⁻¹ para área de superfície de 0 a 1 e dose 200 mL ha⁻¹ em potássio raiz (Tabela 6 e 8). Quando comparada as doses entre si, foi encontrada diferença significativa na dose 500 mL ha⁻¹ em solo arenoso para as seguintes características: área de superfície de 1 a 2 mm e peso seco da parte aérea e em solo argiloso para a característica nitrogênio parte aérea na dose 200 mL ha⁻¹ (Tabela 6 e 8). A modulação da morfologia radicular nos estágios iniciais do desenvolvimento do sorgo promovida pela ação de ambas cepas de *Bacillus* pode levar a uma maior

resistência a estresses abióticos e maior produtividade na fase adulta. Esse remodelamento radicular provavelmente está relacionado com diferentes mecanismos de promoção do crescimento e associação com diferentes genótipos de sorgo. Raízes finas (≤ 2 mm de diâmetro) desempenham um papel crucial na absorção de água e nutrientes, na estrutura do solo e no ecossistema, incluindo a interação com microrganismos (CLEMMENSEN et al., 2013; MCCORMACK et al., 2015).

As diferenças encontradas entre os dois genótipos em características distintas, e a variação conforme a dose de Bioinoculante utilizada, podem ser explicadas pelas respostas fisiológicas e de desenvolvimento específicas de cada genótipo à deficiência de P (LIU et al., 2021). A resposta do Bioinoculante em solo arenoso ocorreu em um maior número de características do que em solo argiloso, que apresentam diferenças na estrutura, porosidade e concentração de nutrientes. O solo argiloso quando comparado com o solo arenoso, apresenta naturalmente maior teor de matéria orgânica, presença de nutrientes que são essenciais para o crescimento e desenvolvimento da planta, enquanto o solo arenoso maior deficiência nutricional.

A análise de componentes principais (PCA) mostrou separação entre os dois genótipos nos dois tipos de solo. Em solo arenoso, o genótipo BRS332 teve maior influência do K na raiz, enquanto o BRS373 pela morfologia radicular e N na raiz. Um maior sistema radicular pode ter facilitado a absorção desses nutrientes, que estavam em quantidade superior ao necessário no solo. O solo arenoso possui baixa retenção de água e nutrientes, o que pode intensificar as diferenças entre genótipos. Já em solo argiloso, o BRS373 teve uma influência do comprimento radicular e da área de superfície de raízes superfinais, enquanto as outras características influenciaram o BRS332. O BRS373, ao investir na morfologia radicular, pode estar compensando a menor disponibilidade de nutrientes, enquanto o BRS332 pode ser mais eficiente na absorção específica de nutrientes. Respostas variáveis à inoculação com BPCPs em diferentes genótipos de uma mesma cultura são amplamente documentadas na literatura (MONTANEZ et al., 2012; VARGAS et al., 2012; ARAÚJO et al., 2014; ALVES et al., 2015; PANKIEVICZ et al., 2015; RODRÍGUEZ-BLANCO et al., 2015; ALVES et al., 2016; KAZI et al., 2016; SALEM et al., 2018). De maneira similar,

sete cepas bacterianas do gênero *Bacillus*, quando inoculadas em três cultivares de trigo, geraram respostas contrastantes em termos de promoção de crescimento (CHANWAY et al., 1988). Já milho inoculado com *Bacillus*, dos 21 genótipos, 16 apresentaram aumento no peso seco e alterações na morfologia radicular, enquanto quatro genótipos mostraram respostas negativas e um permaneceu inalterado em relação ao controle não inoculado (VELLOSO et al, 2020). Ao comparar as respostas dos genótipos às duas bactérias, observou-se que a inoculação com a cepa B116 promoveu predominantemente o aumento de raízes superfinais, enquanto a inoculação com a cepa B119 resultou em maior quantidade de raízes finas. Além disso, os híbridos duplos e triplos demonstraram um efeito mais positivo após a inoculação com a cepa B116, em comparação com a B119 (VELLOSO et al, 2020). A formação da associação entre plantas e BPCPs envolve mecanismos complexos, nos quais o background genético tanto da planta hospedeira quanto das bactérias desempenha um papel fundamental na regulação dessa interação (VIDOTTI et al., 2019). A quantidade e a composição dos exsudatos radiculares de diferentes genótipos podem variar, assim como a ativação de genes relacionados aos mecanismos de defesa das plantas, impactando diretamente as respostas à inoculação (ZAMIOUDIS; PIETERSE, 2012; CHAGAS et al., 2018).

As características moduladas pelas bactérias promotoras de crescimento de plantas variam conforme a interação com diferentes tipos de solo e genótipos inoculados. Em solo arenoso, os efeitos do Bioinoculante foram significativos em diversas características, mesmo nas menores doses, sugerindo uma resposta positiva e possíveis benefícios para a estrutura e a comunidade bacteriana desse solo. Além disso, os genótipos avaliados apresentaram respostas distintas dependendo da dose do Bioinoculante, evidenciando sua influência tanto no solo arenoso quanto no argiloso. Esses resultados reforçam a necessidade de uma compreensão mais aprofundada sobre as características das estirpes bacterianas e a resposta à inoculação com BPCPs em diferentes genótipos e condições edafoclimáticas. Dessa forma, será possível estabelecer a dosagem ideal do Bioinoculante com base no tipo de solo e no genótipo de sorgo utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, V.H.; RIBEIRO, A.C.; RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5 a aproximação. **Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais**, p.25-32, 1999.
- BATTINI, F.; GROLUND, M.; AGNOLUCCI, M.; GIOVANNETTI, M.; JAKOBSEN. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bactéria. **Scientific Reports**, p. 1-11, 2017.
- CANÇADO, G. M. de A.; VASCONCELOS, J. C. S.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; CHRISTOFOLETTI, D.; SEVERINO, F. J.; PINTO JUNIOR, A. S.; MEDEIROS, G. de; BARBOSA, L. A. F.; SPERANZA, E. A.; ANTUNES, J. F. G. Utilização de inoculante líquido solubilizador de fosfato formulado a base dos isolados de *Bacillus megaterium* (b119) e *Bacillus subtilis* (b2084) no plantio da cana-de-açúcar. **Embrapa Digital Agriculture**, 2021.
- CLEMMENSEN, K. E.; BAHR, A.; OVASKAINEN, O.; DAHLBERG, A.; EKBLAD, A.; WALLANDER, H.; STENLID, J.; FINLAY, R. R.; WARDLE, D. A.; LINDAHL, B. D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal. **For Science**, p. 1615-1618, 2013.
- DE MENDIBURU, F., 2019. *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. **R Package Version 1.3-1**. Disponível em: .<<https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>. Acesso em 20 abr 2023.
- SOUSA, S. M.; CLARK, R. T.; MENDES, F. V. F.; OLIVEIRA, A. C.; VASCONCELOS, M. J. V. A.; PARENTONI, S. N.; KOCHIAN, L. V.; GUIMARÃES, C. U. T.; MAGALHÃES, J. V. A role for root morphology and related candidate genes in P acquisition efficiency in maize. **Functional Plant Biology**. v. 39, n. 11, p. 925-935, 2012.
- ERKTAN, A.; CÉCILLON, L.; GRAF, F.; ROUMET, C.; LEGOUT, C.; REY, F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. **Plant Soil**, p. 121-137, 2016.

- HAO, H.; LI, Z.; LENG, C.; LU, C.; LUO, H.; LIU, Y.; WU, X.; LIU, Z.; SHANG, L.; JING, H. C. Sorghum breeding in the genomic era: opportunities and challenges. **Theoretical and Applied Genetics**, 2021.
- HUANG, J.; LI, Y. F.; MA, Y. Y.; LI, Y. S.; JIN, J.; LIAN, T. X. The rhizospheric microbiome becomes more diverse with maize domestication and genetic improvement. **Journal of Integrative Agriculture**, p. 1188-1202, 2022.
- LÓPEZ-ARREDONDO, D.L.; LEYVA-GONZÁLEZ, M.A.; GONZÁLEZ-MORALES, S.I.; LÓPEZ-BUCIO, J.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. **Annu Rev Plant Biology**, v.65, p.95-123, 2014.
- LYNCH, J.P. Steep, cheap and deep: An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. **Annals of Botany**, p. 347–357, 2013.
- WEN, Y.; LIU, W.; DENG, W.; HE, X.; YU, G. Impact of Agricultural Fertilization Practices on Organo-Mineral Associations in Four Long-Term Field Experiments: Implications for Soil C Sequestration. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 591-600, 2019.
- MCCORMACK, M. L.; DICKIE, I. A.; EISSENSTAT, D. M.; FAHEY, T. J.; FERNANDEZ, C. W.; GUO, D.; HELMISAARI, H. S.; HOBBIE, E. A.; IVERSEN, C. M.; JACKSON, R. B.; LEPPÄLAMMI-KUJANSUU, J.; NORBY, R. J.; PHILLIPS, R. P.; PREGITZER, K. S.; PRITCHARD, S. G.; REWALD, B.; ZADWORNÝ, M. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytologist**, p. 505-518, 2015.
- MENEZES, C. B.; FERNANDES, E. A.; PARRELLA, R. A. C.; SCHAFFERT, R. E.; RODRIGUES, J. A. S. Melhoramento Genético de Sorgo. **Embrapa Milho e Sorgo**, ed. 1, p. 1-547, 2021.
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; ALVES, V. M. V.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M.; SANTOS, F. C.; LANDAU, E. C.; PINTO JUNIOR, A. S.; LANA, U. G. Validação da recomendação para uso do inoculante BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus*

megaterium CNPMS B119) na cultura de soja. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 1-19, 2021.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; SANTOS, F. C. dos; PINTO JUNIOR, A. S.; ALVES, V. M. C. Viabilidade Técnica e Econômica do BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas Culturas de Milho e Soja. **Embrapa Milho e Sorgo**, ed. 1, p. 1-21. 2020a.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JUNIOR, R. Recomendação agronômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas - MG. **Circular Técnica**, p.1-18, 2020b.

RAO, P. S.; THOMAS, T.; DAVID, A. Soil Chemical Properties and Available Macronutrients in Silt Clay Loam and Sandy Clay Loam Soil. **Chemical Science Review and Letters**, v. 6, p. 899-905, 2017.

SENDEK, A.; KARAKOÇ, C.; WAGG, C.; DOMÍNGUEZ-BEGINES, J.. Drought modulates interactions between arbuscular mycorrhizal fungal diversity and barley genotype diversity. **Scientific Reports**, p. 1-15, 2019.

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

YUE, L.; WANG, Y.; WANG, L.; YAO, S.; CONG, C.; REN, L.; ZHANG, B. Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure. **Soil Tillage Res**, 2021.

CAPÍTULO II

Efeito da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato em genótipos de sorgo cultivados em solo arenoso

Sorgo (*Sorghum bicolor*) é o quinto cereal mais importante do mundo em termos de produção e área de plantio, sendo amplamente utilizado nos últimos anos devido à sua resistência e bom crescimento em condições de déficit hídrico (HAO et al., 2021). O sorgo granífero é especialmente valorizado na agroindústria de rações por seus grãos de baixo custo e capacidade de ser cultivado em épocas tardias, quando o volume de chuva é insuficiente para outras culturas. Por isso, é frequentemente utilizado na sucessão às culturas de verão, como a soja, na chamada segunda safra (LANDAU & NETTO, 2015; MENEZES et al., 2018). A deficiência de fósforo (P) no solo é uma grande preocupação para a produção agrícola, pois esse nutriente é essencial para o crescimento das plantas (BATTINI et al., 2017). Uma alternativa para aumentar a disponibilidade de P é o uso de inoculantes com microrganismos solubilizadores de fosfato (MSF). Esses inoculantes oferecem diversos benefícios para o solo e as plantas, incluindo menor custo e maior sustentabilidade ambiental, com a possibilidade de redução do uso de fertilizantes químicos sintéticos (KALAYU, 2019; OLIVEIRA et al., 2020). O BiomaPhos® contém as estirpes *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119), que apresentam mecanismos como a produção de ácido indol-acético (AIA), sideróforos, exopolissacarídeos, formação de biofilme, solubilização de P, que aumentam o sistema radicular e a produtividade de diferentes culturas (VELLOSO et al., 2020; SOUSA et al., 2021). O BiomaPhos® tem sido utilizado em soja, milho, feijão e cana-de-açúcar, dentre outras culturas no Brasil nos últimos anos (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2020, 2024; CANÇADO et al. 2021; SOUZA et al. 2023; BITTENCOURT et al. 2024). No entanto, para sorgo ainda não existem dados sobre a dose indicada deste bioinoculante. A hipótese deste estudo é que a inoculação com o bioinoculante BiomaPhos®, contendo estirpes de *Bacillus* solubilizadoras de fosfato, influencia positivamente o crescimento radicular, a absorção de fósforo e a microbiota rizosférica do milho e sorgo, variando de acordo com o tipo de solo e a dose aplicada. Além disso,

espera-se que os efeitos sejam mais evidentes em solos com menor disponibilidade de fósforo, promovendo maior eficiência no uso do nutriente e potencializando o desenvolvimento das plantas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes doses do bioinoculante em genótipos de sorgo cultivados sob condições de campo em solo arenoso.

METODOLOGIA

DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foi instalado na fazenda Trijunção, localizada em Jaborandi – BA (latitude 14° 38' 38" Sul, longitude 45° 48' 8" Oeste) na safra de 2021/2022 um experimento com os tratamentos dispostos em fatorial 2x5, sendo dois genótipos de sorgo granífero (BRS 310 e BRS 373) e cinco doses do inoculante solubilizador de P BiomaPhos® (0, 50, 100, 200 e 500 mL ha⁻¹). O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com quatro repetições. As parcelas foram compostas de 6 linhas de 5 m de comprimento e espaçadas em 0,5 m.

Foram colocadas sementes o suficiente para atingir população final de 180 mil plantas ha⁻¹, em plantio manual, para posterior realização de desbaste. A adubação de plantio foi de 275 kg ha⁻¹ de 04-30-16 + 30 FTE BR12 realizada no sulco de semeadura. As sementes de sorgo foram tratadas um dia antes do plantio com o Cropstar na dose de 125 mL 10 kg⁻¹ semente (recomendado para a cultura de sorgo). As doses do BiomaPhos® foram aplicadas nas sementes no dia do plantio, que foi realizado manualmente. Foi realizada a adubação de cobertura com o formulado 20-00-20 na dose de 300 kg ha⁻¹ e Quimifol Cerrado na dose de 1 L ha⁻¹ por aplicação. Na fase de emborrachamento, foi realizada a diagnose nutricional do N, P e K da parte aérea e as análises de arquitetura radicular e diversidade genética de microrganismos. Ao final do ciclo foram avaliadas as características altura de plantas, produção de grãos, N, P e K nos grãos e P disponível no solo (Mehlich-1 e Resina). Para análise de P do solo foi realizada a coleta do solo de 0 a 20 cm de profundidade de cada parcela.

AVALIAÇÃO DA ARQUITETURA DA RAIZ

Para avaliação da arquitetura das raízes, o sistema radicular de três plantas de milho de cada parcela foi coletado ao acaso nas fileiras mais externas, e processado conforme descrito pela metodologia *Shovelomics* (TRACHSEL et al., 2011). As raízes foram lavadas, fotografadas e os parâmetros de arquitetura do sistema radicular (ASR) (Tabela 1) foram mensurados na plataforma online *Digital Imaging of Root Traits- DIRT 5.2* (BUCKSCH et al. 2014; DAS et al., 2015) otimizada de acordo com CAMPOLINO et al., 2023.

Tabela 1. Descrição das características das raízes de milho de acordo com BUCKSCH et al., 2014.

Características	Descrição
AREA	Área de raiz projetada
WIDTH_MAX	Largura máxima do sistema radicular medida horizontalmente
D10	Porcentagem de acúmulo de largura a 10% de profundidade
SKL_WIDTH	Largura do esqueleto calculada a partir do eixo medial
ANG_TOP	Topo do ângulo da raiz medido entre a linha de ajuste Random Sample Consensus na profundidade do valor D10 e a linha horizontal do solo
RTA_MAX	Ângulo máximo do tecido radicular medido sobre todos os RTPs - Número de Caminhos de Ponta Raiz
STA_MAX	Ângulo máximo do tecido do solo medido sobre todos os RTPs

EXTRAÇÃO DO DNA DO SOLO RIZOSFÉRICO

Das três raízes de plantas de sorgo coletadas foi removido o solo rizosférico e foi coletado o solo não rizosférico. Foram pesados 0,45 gramas de solo cujo DNA extraído com o Kit DNAeasy® PowerSoil (Qiagen), conforme as recomendações do fabricante. O DNA foi quantificado em espectrofotômetro Nanodrop® (Thermo Fisher Scientific, EUA) e diluído para concentração de 5,0

ng μL^{-1} . Fragmentos do gene 16S rRNA foram amplificados utilizando os oligonucleotídeos 8F-FAM 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3' (LIU et al., 1997; LAMONTAGNE et al., 2001) marcados com fluorescência na posição 5' e 1492R, 5'-TACGGTACCTTGTTACGACTT-3' (TURNER et al., 1999). Para a reação de PCR foram utilizados 15 ng de DNA, 2 μl de cada oligonucleotídeo (5 ng μl^{-1}), 1X do tampão de reação, 2,5 mM de MgCl_2 , dNTPs 2,5 mM cada, 2,5 U de Taq DNA polimerase (Promega GoTaq® G2 Flexi DNA Polymerase), em um volume final de 50 μL . A amplificação foi realizada no termociclador ProFlex PCR System (Applied Biosystems colocar o país) com desnaturação inicial a 95 °C por 2 min, seguida por 30 ciclos de 95 °C por 1 minuto, anelamento dos oligonucleotídeos a 58 °C por 1 minuto, extensão a 72 °C por 1 minuto e extensão final a 72 °C por 5 minutos. Uma alíquota de 1 μL dos produtos de PCR foi corada com GelRed (Biotium, Hayward, Califórnia, USA) e submetida a eletroforese em gel de agarose 1% (m/v), utilizando como marcador de peso molecular 1Kb Plus DNA Ladder (Life Technologies, USA). A visualização do DNA amplificado foi realizada em transluminador sob luz ultravioleta e fotografada no equipamento L-PIX Image EX (Loccus Biotecnologia - Loccus do Brasil, Cotia, SP, Brasil) CAMPOLINO et al., 2022.

Para a amplificação do gene 28S rRNA de FMA foi utilizado nested-PCR. Para a primeira PCR foram utilizados 15 ng de DNA, 2 μl do oligonucleotídeo LR1 (5 ng/ μl) (5'-GCA TAT CAA TAA GCG GAG GA-3') (TUINEN et al., 1998; TROUVELOT et al., 1999), 2 μl do oligonucleotídeo FLR2 (5 ng/ μl) (5'-GTC GTT TAA AGC CAT TAC GTC-3') (TROUVELOT et al., 1999), 1X do tampão de reação, 2,5 mM de MgCl_2 , dNTPs 2,5 mM cada, 2,5 U de Taq DNA polimerase (Promega GoTaq® G2 Flexi DNA Polymerase), em um volume final de 50 μL . A amplificação foi realizada no termociclador ProFlex PCR System (Applied Biosystems) com desnaturação inicial a 95 °C por 2 min, seguida por 30 ciclos de 95 °C por 1 minuto, anelamento dos oligonucleotídeos a 58 °C por 1 minuto, extensão a 72 °C por 1 minuto e extensão final a 72 °C por 5 minutos. Durante o último ciclo do programa, o comprimento da etapa de extensão foi de 7 minutos. Para a segunda PCR foram utilizados 15 ng do produto da primeira PCR, 2 μl do oligonucleotídeo FLR3 (5 ng μl^{-1}) (5'-[6FAM] TTGAAAGGGAAACGATT-3') (GOLLOTTE et al., 2004), 2 μl do oligonucleotídeo FLR4 (5 ng/ μl) (5'-[HEX]TACGTCAACATCCTTAACGAA-3') (GOLLOTTE et al., 2004), 1X do

tampão de reação, 2,5 mM de $MgCl_2$, dNTPs 2,5 mM cada, 2,5 U de Taq DNA polimerase (Promega GoTaq® G2 Flexi DNA Polymerase), em um volume final de 50 μL . A amplificação foi realizada no termociclador ProFlex PCR System (Applied Biosystems) nas mesmas condições da primeira reação. Uma alíquota de 1 μL dos produtos da PCR foi corada com GelRed (Biotium, Hayward, Califórnia, USA) e submetida a eletroforese em gel de agarose 1% (m/v), seguindo o mesmo procedimento posterior à amplificação do gene 16S rRNA. A visualização do DNA amplificado foi realizada em transluminador sob luz ultravioleta e fotografada no equipamento L-PIX Image EX (Loccus Biotecnologia - Loccus do Brasil, Cotia, SP, Brasil) (CAMPOLINO *et al.*, 2022).

GENOTIPAGEM POR T-RFLP (*TERMINAL RESTRICTION FRAGMENT LENGTH POLYMORPHISM*)

Os fragmentos amplificados das regiões 16S rDNA (bactérias) e 28S rDNA (FMA) foram digeridos com as enzimas de restrição *AluI* *HaeIII* e *HpaII*. Para a digestão com as enzimas, foram utilizados 10 μL do produto de PCR, 2 μL do tampão da enzima 10X e 1 μL da enzima 10 U μL^{-1} , incubados a 37 °C por 4 horas. Para avaliar os fragmentos de DNA gerados, 2 μL da digestão foram adicionados a 9,8 μL de formamida deionizada (Applied Biosystems, EUA) e 0,2 μL de padrão ROX 500 (Applied Biosystems). As amostras foram desnaturadas a 95°C por 5 minutos e incubadas em gelo até a injeção no equipamento. Os perfis de digestão foram avaliados no equipamento Genetic Analyzer 3500XL (Applied Biosystems) com o software GeneMapper 5.0 (Applied Biosystems). Os picos com tamanho entre 30 e 500 pares de bases e com uma altura de fluorescência superior a 40 unidades foram considerados para a análise do perfil. Foi utilizado o programa T-REX para o alinhamento de diferentes amostras e perfis de duas corridas de cada amostra. Para gerar os dados, matrizes T-RFs com $\geq 1\%$ de abundância relativa das espécies microbianas, foram determinadas pela média dos valores dos tamanhos de T-RF, das digestões realizadas com as enzimas de restrição. O software Past v.3.25 (HAMMER *et al.*, 2001) foi utilizado para calcular a similaridade entre os tamanhos dos fragmentos, e então o perfil de diversidade de bactérias e FMA foi avaliado por escala não métrica multidimensional (NMDS) baseada na matriz de distância de Bray-Curtis.

AValiação Qualitativa e Quantitativa da Colonização Micorrízica

As raízes finas de sorgo foram retiradas de três plantas para cada tratamento e transferidas para tubos cônicos contendo etanol 70% e armazenadas em geladeira, a 4 °C, durante 3 dias. Após esse período, as raízes foram lavadas com água deionizada e imersas em hidróxido de potássio (KOH) 10% durante a noite, à temperatura ambiente. No dia seguinte, elas foram novamente lavadas e imersas em ácido clorídrico (HCl) 0,3 M por 30 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, o HCl foi removido e as raízes foram coradas com azul de metileno por 30 minutos à temperatura ambiente e transferidas para um novo tubo cônico contendo solução de glicerol acidificada (1:1 glicerol e HCl 0,3 M). A colonização micorrízica foi quantificada seguindo o método *grid-line intersect* descrito por Paszkowski (2006), com modificações. Resumidamente, a colonização total foi determinada pela quantidade total de FMA e pela presença de estruturas fúngicas específicas, vesículas e arbúsculos, em estereoscópio Axio Zoom V16 (Zeiss) com aumento de 20 vezes em 100 pontos de interseção por amostra radicular. Para uma representação confiável da colonização radicular por estruturas micorrízicas específicas, todas as estruturas presentes em um mesmo ponto de interseção foram consideradas. Os percentuais de micorrização para cada um dos tratamentos foram normalizados usando arcoseno dos valores antes da realização da análise estatística (ANOVA). As médias foram comparadas utilizando-se o teste LSD a 5% de probabilidade, por meio do software R

ANÁLISE DA FOSFATASE ÁCIDA E ALCALINA

O solo rizosférico (0-20 cm) extraído das proximidades das raízes coletadas foi peneirado com peneira de 2 mm, sendo pesado 0,15 g para análise da atividade das enzimas fosfatase ácida e alcalina. O método foi o descrito por Tabatabai (1994) com adaptações, e envolveu extração e determinação quantitativa de p-nitrofenol liberado quando o solo é incubado por uma hora a 37 °C com p-nitrofenil fosfato ou bis-p-nitrofenil fosfato em tampão universal modificado ajustado para pH 6,5 e 11 para fosfatase ácida e alcalina,

respectivamente. As reações foram interrompidas pela adição de CaCl_2 e NaOH . As soluções foram centrifugadas a 8000 rpm por 5 minutos e o sobrenadante foi usado para medições colorimétricas a 400 nm no espectrofotômetro. A concentração de p-nitrofenol presente em cada amostra foi determinada com base na curva padrão. Os resultados obtidos da atividade das enzimas foram expressos em $\text{g pnitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de solo. As atividades enzimáticas foram avaliadas em amostras de solo da rizosfera em triplicata. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas utilizando-se o teste LSD a 5% de probabilidade, por meio do software R.

RESULTADOS

ANÁLISE AGRONÔMICA DE GENÓTIPOS DE SORGO CULTIVADO EM SOLO ARENOSO COM DIFERENTES DOSES DE BIOINOCULANTE

Foram observadas diferenças significativas para a variável genótipo nas seguintes características, altura (ALTURA), matéria verde total (MV) e matéria seca total (MS). Não foram encontradas diferenças significativas para dose de Bioinoculante. Para bloco foram encontradas diferenças significativas para as características fósforo resina (P_RESINA) e fósforo total (P_TOTAL). Na interação dose x bloco foi encontrada diferença significativa na característica fósforo extraído (P_EXT) (Tabela 2). No teste de média das características dos genótipos BRS310 e BRS373 com diferentes doses de Bioinoculante quando comparados com a dose controle, foram encontradas diferenças significativas nas características: altura (ALTURA_M), fósforo extraído (P_EXT), potássio extraído (K_EXT) e magnésio extraído (MG_EXT) para a dose 100 mL ha^{-1} de Bioinoculante no genótipo BRS373 (Tabela 3).

Tabela 2. Análise de variância das características agrônômicas e nutricionais para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.

	GL	QUADRADO MÉDIO													
		ALTURA	MV	MS	PANICULA MV	PROD	PANICULA MS	P-RESINA	P TOTAL	K	N_EXT	P_EXT	K_EXT	MG_EXT	S_EXT
Genótipo	1	0,09 *	149,19 ***	19,59 ***	0,93	0,0003	0,84	8,5	26,6	57,67	105,27	1,40	0,15	0,58	0,18
Dose Bioinoculante	4	0,004	1,45	0,25	0,23	0,08	0,13	96,7	295,4	31,14	45,22	2,59	1,92	0,57	0,27
Bloco	3	0,020	4,63	0,73	0,50	0,34	0,41	1736,2 ***	1478,9 *	64,09	266,86	3,47	3,64	0,55	0,27
Dose x Bloco	12	0,012	3,05	0,42	0,89	0,41	0,69	38,0	501,7	45,25	222,37	6,53 .	7,69	1,25	0,30
Erro	19	0,015	3,61	0,65	0,57	0,21	0,43	47,7	381,3	39,27	172,15	3,12	5,04	0,71	0,17
C.V.		12,06	17,87	22,57	21,58	25,95	21,74	42,53	21,76	35,51	25,45	30,83	50,43	34,89	19,75

*Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD de média ($p < 0,05$). ¹Doses de Bioinoculante (mL ha^{-1}). ²Altura (m), matéria verde total (MV) (g), matéria verde total (MV) (g), produtividade (PROD) (ton ha^{-1}) matéria seca panícula (PANICULA MS) (g), fósforo resina (P-RESINA) (mg dm^3), fósforo resina (P-RESINA), fósforo total (P-TOTAL), potássio por miligrama (K-MG), nitrogênio extraído (N-EXT), fósforo extraído (P-EXT), potássio extraído (K-EXT), magnésio extraído (MG-EXT) e enxofre extraído (S-EXT).

Tabela 3. Teste de Média das características agrônômicas e nutricionais para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em com diferentes doses arenoso de Bioinoculante.

Bioinoculante	ALTURA		MV_TOTAL		MS_TOTAL		MV_PANICULA		PRODUTIVIDADE		MS_PANICULA		P_RESINA	
	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373
0	0,95 ^{Ba}	1,09 ^{ABab}	13,06 ^{Aa}	8,76 ^{Aa}	4,28 ^{Aa}	2,96 ^{Aa}	3,68 ^{Aa}	3,41 ^{Aa}	2,06 ^{Aa}	2,04 ^{Aa}	3,18 ^{Aa}	2,92 ^{Aa}	15,03 ^{Aa}	13,18 ^{Aa}
50	0,94 ^{Aa}	1,23 ^{Aa}	11,34 ^{Aa}	9,01 ^{Aa}	3,83 ^{Aa}	2,86 ^{Aa}	3,81 ^{Aa}	3,56 ^{Aa}	2,15 ^{Aa}	2,24 ^{Aa}	3,28 ^{Aa}	3,03 ^{Aa}	13,63 ^{Aa}	25,43 ^{Aa}
100	1,03 ^{Ba}	1,07 ^{Bb}	12,94 ^{Aa}	9,41 ^{Aa}	4,46 ^{Aa}	3,13 ^{Aa}	3,78 ^{Aa}	3,53 ^{Aa}	2,15 ^{Aa}	2,21 ^{Aa}	3,26 ^{Aa}	3,04 ^{Aa}	13,15 ^{Aa}	11,38 ^{Aa}
200	1,01 ^{ABa}	1,07 ^{Bab}	12,57 ^{Aa}	8,79 ^{Aa}	4,36 ^{Aa}	2,87 ^{Aa}	3,66 ^{Aa}	3,01 ^{Aa}	2,11 ^{Aa}	1,19 ^{Aa}	3,20 ^{Aa}	2,59 ^{Aa}	20,28 ^{Aa}	9,88 ^{Aa}
500	1,05 ^{Ba}	1,01 ^{Bb}	12,94 ^{Aa}	7,56 ^{Aa}	4,37 ^{Aa}	2,49 ^{Aa}	3,38 ^{Aa}	3,28 ^{Aa}	1,94 ^{Aa}	2,04 ^{Aa}	2,97 ^{Aa}	2,86 ^{Aa}	21,40 ^{Aa}	19,03 ^{Aa}

*Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD de média ($p < 0,05$). ¹ Doses de Bioinoculante (mL ha^{-1}).

²Altura (m), matéria verde total (MV-TOTAL) (g), matéria seca total (MS-TOTAL) (g), produtividade (ton ha^{-1}), matéria seca panicula (MS-PANÍCULA) (g) e fósforo resina (P-RESINA) (mg dm^3).

Bioinoculante	P_TOTAL		K_MG		N_EXT		P_EXT		K_EXT		MG_EXT		S_EXT	
	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373
0	87,50 ^{Aa}	84,73 ^{Aa}	18,90 ^{Aa}	18,58 ^{Aa}	48,47 ^{Aa}	49,62 ^{Aa}	5,24 ^{Ba}	5,59 ^{Bb}	4,12 ^{Ba}	4,04 ^{Bb}	2,22 ^{Ba}	2,36 ^{Bb}	2,03 ^{Aa}	2,30 ^{Aa}
50	92,28 ^{Aa}	92,98 ^{Aa}	13,43 ^{Ab}	18,85 ^{Aa}	47,84 ^{Aa}	60,13 ^{Aa}	5,21 ^{Aa}	8,23 ^{Aa}	3,91 ^{Aa}	6,56 ^{Aa}	2,15 ^{Aa}	3,65 ^{Aa}	2,04 ^{Aa}	2,39 ^{Aa}
100	85,93 ^{Aa}	101,68 ^{Aa}	17,45 ^{Aab}	23,23 ^{Aa}	54,22 ^{Aa}	54,17 ^{Aa}	5,28 ^{Ba}	6,09 ^{Bb}	3,55 ^{Ba}	4,52 ^{Bb}	2,06 ^{Ba}	2,59 ^{Bb}	2,43 ^{Aa}	2,36 ^{Aa}
200	77,23 ^{Aa}	84,50 ^{Aa}	15,68 ^{Aab}	18,08 ^{Aa}	52,13 ^{Aa}	48,75 ^{Aa}	5,78 ^{Ba}	4,93 ^{Bb}	5,01 ^{Ba}	3,60 ^{Bb}	2,43 ^{Ba}	2,15 ^{Bb}	2,00 ^{Aa}	1,86 ^{Aa}
500	101,70 ^{Aa}	88,90 ^{Aa}	17,05 ^{Aab}	17,25 ^{Aa}	46,97 ^{Aa}	53,17 ^{Aa}	6,21 ^{Ba}	4,74 ^{Bb}	5,98 ^{Ba}	3,24 ^{Bb}	2,66 ^{Ba}	1,97 ^{Bb}	1,86 ^{Aa}	2,13 ^{Aa}

*Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD de média ($p < 0,05$). ¹ Doses de Bioinoculante (mL ha^{-1} por 200.000 sementes). ²Fósforo total (P-TOTAL), potássio por miligrama (K-MG), nitrogênio extraído (N-EXT), fósforo extraído (P-EXT), magnésio extraído (MG-EXT) e enxofre extraído (S-EXT).

Quando realizada a comparação das diferentes doses de Bioinoculante foi observada diferença significativa na característica altura (ALTURA_M), fósforo extraído (P_EXT), potássio extraído (K_EXT) e magnésio extraído (MG_EXT) na dose 100 mL ha⁻¹ de Bioinoculante, para ambos os genótipos (Tabela 2). Foram observadas diferenças significativas para genótipo para altura (ALTURA), matéria verde total (MV), matéria seca total (MS) (Tabela 2). Não foi encontrada nenhuma diferença significativa na variável dose de Bioinoculante (Tabela 2). Para a variável bloco foram encontradas diferenças significativas nas características: fósforo resina (P_RESINA) e fósforo total (P_TOTAL). Na variável dose x bloco foi encontrada diferença significativa na característica fósforo extraído (P_EXT) (Tabela 2). O teste de médias das características de produtividade de grãos e conteúdo de P, dos genótipos BRS 310 e BRS 373 de sorgo crescidos em diferentes doses de Bioinoculante, mostrou que há variabilidade entre os genótipos e entre as doses de Bioinoculante, quanto as características analisadas (Tabela 3).

Em ambos os genótipos, BRS 310 e BRS 373, não houve diferença significativa nas diferentes doses de Bioinoculante para as características altura em metro (ALTURA), matéria verde total (MV TOTAL), matéria seca total (MS), matéria verde panícula (MV) produção de tonelada por hectare (PRODUÇÃO), matéria seca panícula (MS PANICULA), fósforo resina (P-RESINA), fósforo total (P-TOTAL), potássio por miligrama (K_MG), nitrogênio extraído (N_EXT) e enxofre extraído (S_EXT) quando comparadas a dose controle (Tabela 3). No genótipo BRS 310 para as características fósforo extraído (P_EXT), potássio extraído (K_EXT) e magnésio extraído (MG_EXT) não foi encontrada diferença significativa entre as diferentes doses de Bioinoculante.

Para o genótipo BRS 373 houve diferença significativa de acordo com a dose de Bioinoculante utilizada, sendo o maior resultado encontrado na dose 100 mL·ha⁻¹ de Bioinoculante (Tabela 3). Quando comparadas as doses de Bioinoculante dentro de cada tratamento para a característica altura (ALTURA), fósforo extraído (P_EXT), potássio extraído (K_EXT) e magnésio extraído (MG_EXT) foi encontrada diferença significativa nos dois genótipos, sendo

encontrado o maior resultado na dose 100 mL ha⁻¹ de Bioinoculante. Para as características matéria verde total (MV_TOTAL), matéria seca total (MS_TOTAL), matéria verde panícula (MV_PANICULA), produção tonelada por hectare (PRODUÇÃO T HA⁻¹), matéria seca panícula (MS_PANICULA), fósforo resina (P_RESINA), fósforo total (P_TOTAL), potássio externo (K), nitrogênio extraído (N_EXT) e enxofre extraído (S_EXT), não foi encontrada diferença significativa quando comparadas as doses de Bioinoculante dentro de cada tratamento (Tabela 3).

ANÁLISE DA ARQUITETURA RADICULAR DE SORGO

Foram observadas diferenças significativas para genótipo e dose x bloco para as seguintes características, largura máxima (WIDTH_MAX) e largura do esqueleto (SKLWIDTH). Para dose Bioinoculante foi encontrada diferença significativa para as características diâmetro de raiz de 0 a 10 (D10) e ângulo superior da raiz (ANG_TOP). Não foi encontrada diferença significativa para bloco (Tabela 4). Foram observadas diferenças significativas em genótipo para as características WIDTH_MAX e SKLWIDTH (Tabela 4). Para dose de Bioinoculante foi encontrada diferença significativa para as características D10 e ANG_TOP. Não foi encontrada nenhuma diferença significativa entre os blocos. Na interação entre Dose x Bloco, foi encontrada diferença significativa nas características WIDTH_MAX e SKL_WIDTH. No teste de média das características dos genótipos BRS310 e BRS373 com diferentes doses de Bioinoculante quando comparados com a dose controle, foram encontradas diferenças significativas para ambos os genótipos na característica D10, sendo que no genótipo BRS310 na dose 300 mL ha⁻¹ de Bioinoculante, enquanto no genótipo BRS373 na dose 500 mL ha⁻¹ de Bioinoculante (Tabela 5).

	GL	Quadrado médio						
		AREA	WIDTH_MAX	D10	SKL_WIDTH	ANG_TOP	STA_MAX	RTA_MAX
Genótipo	1	1555127	371,3 .	0,00004	558,9 .	7,97	0,003	0,70
Dose Bioinoculante	4	2581597	122,8	0,0058 **	277,5	185,75 **	0,008	0,99
Bloco	3	1809797	133,6	0,00042	61,1	73,67	0,008	0,83
Dose x Bloco	12	2279285	450,5 **	0,0005	659,5 **	31,68	0,003	2,67
Erro	19	1441891	111,2	0,00078	174,8	31,06	0,016	1,66
C.V.		20,66	7,57	12,77	8,57	10,30	0,14	1,55
Significância do teste LSD: 0 **** 0.001 *** 0.01 * 0.05 . 0.1 ' 1								

Tabela 5. Médias das características de arquitetura radicular (AREA, WIDTH_MAX, D10, SKL_WIDTH, ANG_TOP, STA_MAX e RTA_MAX_ para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo cultivados em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante

Bionoculante	AREA		WIDTH_MAX		D10		SKL_WIDTH		ANG_TOP		STA_MAX		RTA_MAX	
	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373
0	5355,75 ^{Aa}	5030,58 ^{Aa}	138,32 ^{Aa}	134,05 ^{Aa}	0,20 ^{Ac}	0,20 ^{Ab}	148,62 ^{Aa}	147,53 ^{Aa}	58,87 ^{Aa}	59,80 ^{Aa}	89,85 ^{Aa}	89,84 ^{Aa}	83,51 ^{Aa}	83,62 ^{Aa}
50	5491,84 ^{Aa}	5473,68 ^{Aa}	145,12 ^{Aa}	138,85 ^{Aa}	0,20 ^{Ac}	0,22 ^{Aab}	159,80 ^{Aa}	150,57 ^{Aa}	58,06 ^{Aa}	54,10 ^{Aab}	89,83 ^{Aa}	89,91 ^{Aa}	83,19 ^{Aa}	83,21 ^{Aa}
200	5552,38 ^{Aa}	5611,63 ^{Aa}	135,75 ^{Aa}	132,81 ^{Aa}	0,18 ^{Ac}	0,21 ^{Ab}	152,38 ^{Aa}	148,36 ^{Aa}	58,64 ^{Aa}	55,83 ^{Aab}	89,86 ^{Aa}	89,82 ^{Aa}	83,53 ^{Aa}	83,68 ^{Aa}
300	6814,84 ^{Aa}	5683,79 ^{Aa}	146,26 ^{Aa}	135,92 ^{Aa}	0,27 ^{Aa}	0,23 ^{Bab}	162,22 ^{Aa}	146,15 ^{Aa}	45,38 ^{Ab}	53,16 ^{Ab}	89,78 ^{Aa}	89,83 ^{Aa}	82,56 ^{Aa}	82,97 ^{Aa}
500	6835,50 ^{Aa}	6278,87 ^{Aa}	146,64 ^{Aa}	139,10 ^{Aa}	0,25 ^{Ab}	0,24 ^{Aa}	166,93 ^{Aa}	159,97 ^{Aa}	47,51 ^{Ab}	50,01 ^{Ab}	89,80 ^{Aa}	89,80 ^{Aa}	82,74 ^{Aa}	83,38 ^{Aa}

Médias seguidas pela mesma letra na apresentam diferença significativa ao nível de 0,05% de significância pelo teste LSD

ANÁLISE DA DIVERSIDADE GENÉTICA DE MICRORGANISMOS

Foram encontradas diferenças significativas na diversidade genética das comunidades microbianas da rizosfera entre os genótipos BRS 310 e BRS 373 e solo não rizosférico (Figura 1).

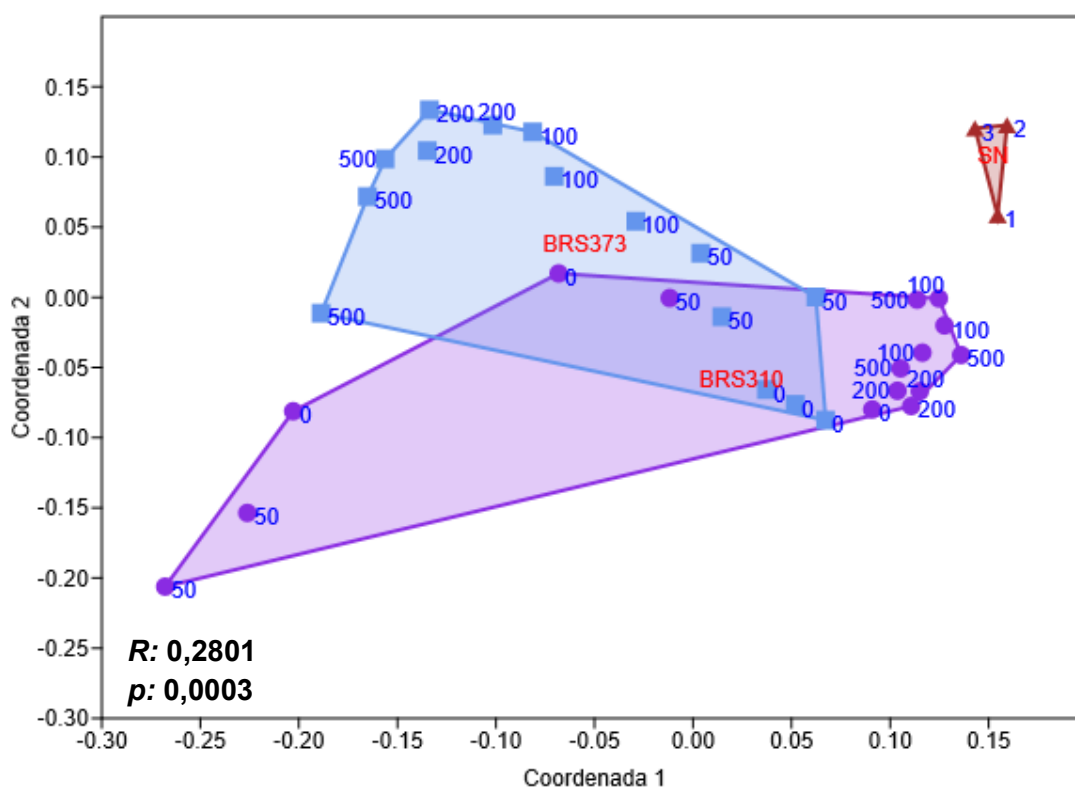


Figura 1. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade bacteriana do genótipo BRS 310 e BRS 373. Os pontos coloridos nos perfis NMDS são referentes aos tratamentos: ● genótipo BRS 310 e ■ genótipo BRS 373. Dose 0 mL ha⁻¹, dose 50 mL ha⁻¹, dose 100 mL ha⁻¹, dose 200 mL ha⁻¹, dose 500 mL ha⁻¹ e ▲ solo não rizosférico.

A diversidade genética bacteriana da rizosfera do sorgo foi diferente nas diferentes doses de Bioinoculante tanto no genótipo BRS 310 (Figura 2) quanto no BRS 373 (Figura 3).

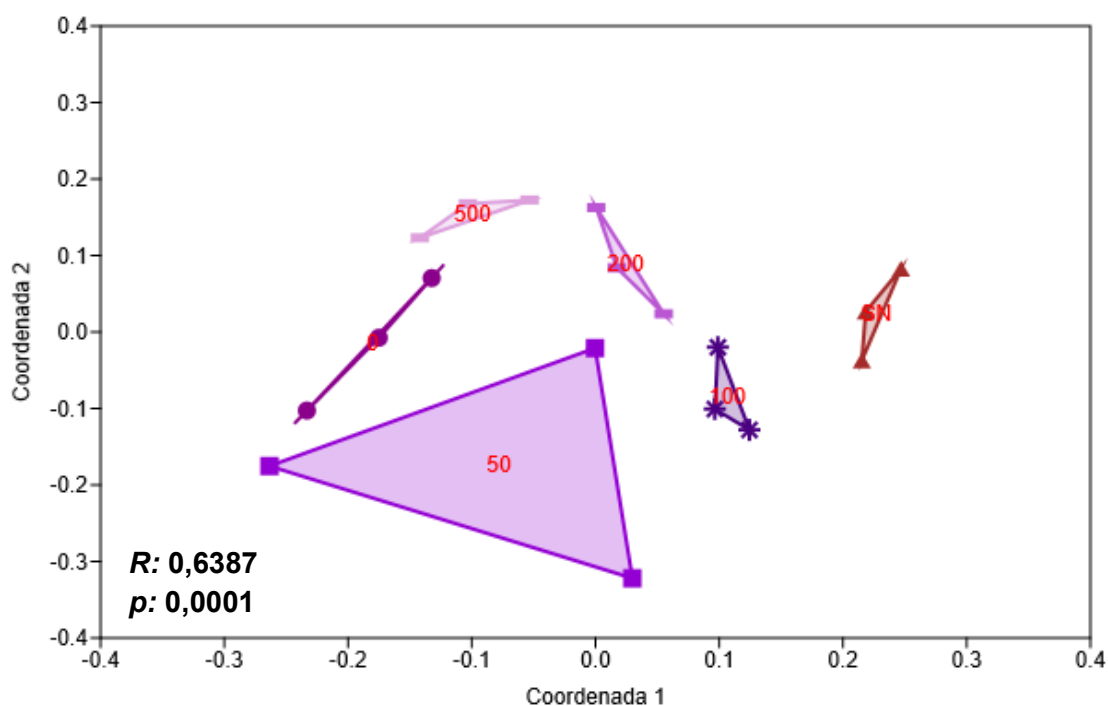


Figura 2. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade bacteriana do solo rizosférico do genótipo BRS 310. Na figura, os pontos coloridos nos perfis NMDS são referentes aos tratamentos: ● dose 0 mL ha⁻¹, ■ dose 50 mL ha⁻¹, * dose 100 mL ha⁻¹, — dose 200 mL há⁻¹, ◆ dose 500 mL há⁻¹ e ▲ solo não rizosférico.

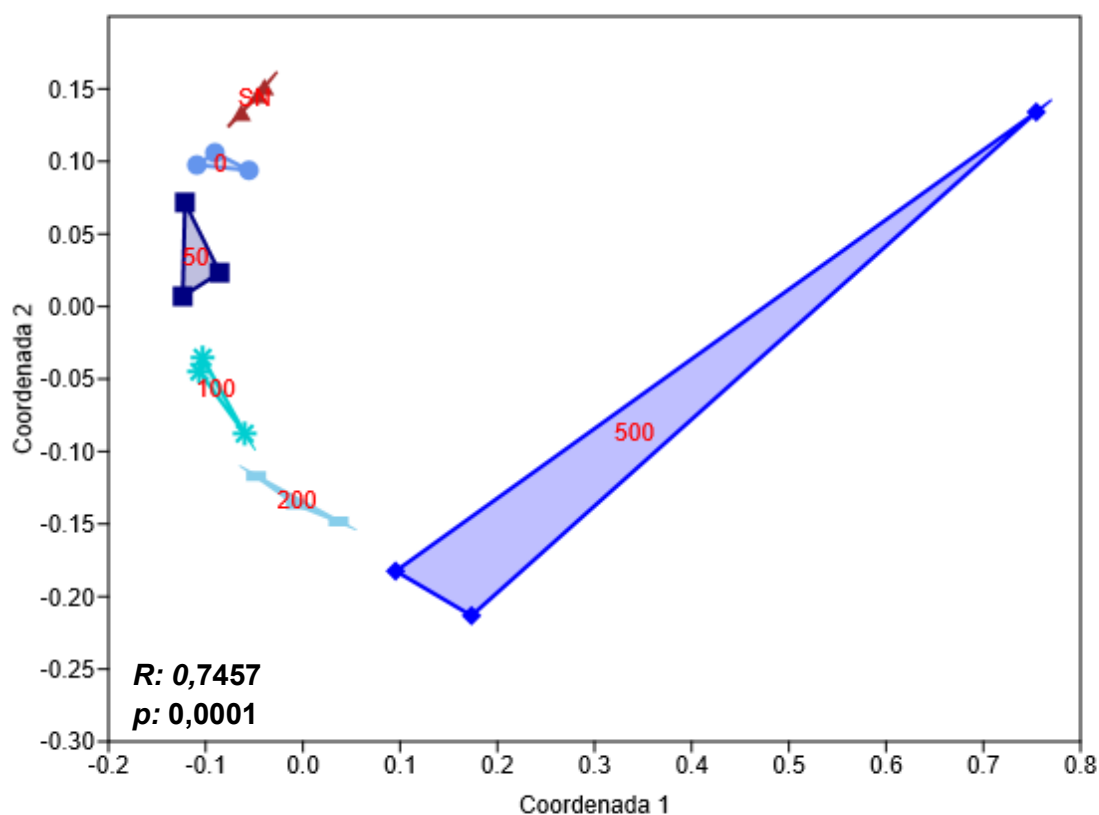


Figura 3. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade bacteriana do solo rizosférico do genótipo BRS 373 de sorgo com diferentes doses de BiomaPhos®. Na figura, os pontos coloridos nos perfis NMDS são referentes aos tratamentos ● Dose 0 mL ha⁻¹, ■ Dose 50 mL ha⁻¹, * dose 100 mL ha⁻¹, — dose 200 mL ha⁻¹ e ◆ dose 500 mL ha⁻¹ e ▲ solo não rizosférico.

Não foram encontradas diferenças significativas na diversidade genética das comunidades fúngicas da rizosfera dos genótipos BRS310 e BRS373 (Figura 4) e entre as diferentes doses de Bioinoculante para os genótipos BRS310 (Figura 5) e BRS373 (Figura 6).

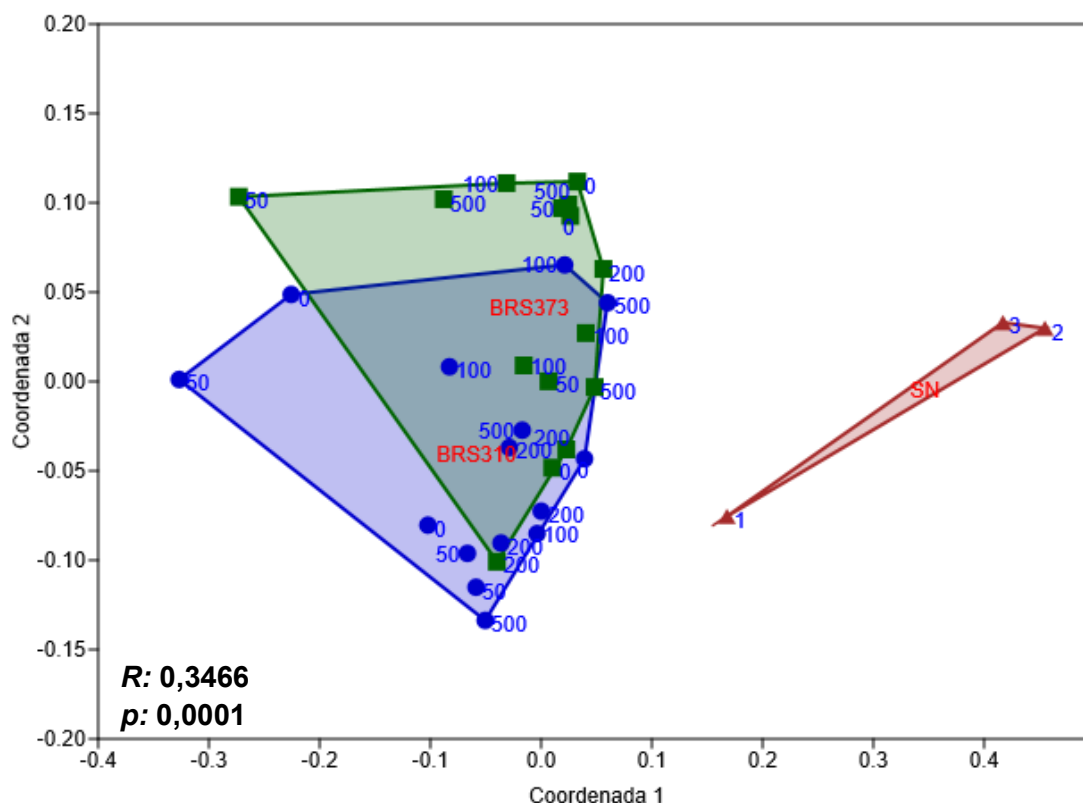


Figura 4. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade fúngica do genótipo BRS 310 e BRS 373, os pontos coloridos nos perfis NMDS são referentes aos tratamentos: ● BRS 310 e ■ BRS 373. Dose 0 mL ha⁻¹, dose 50 mL ha⁻¹, dose 100 mL ha⁻¹, dose 200 mL ha⁻¹, dose 500 mL ha⁻¹ e ▲ solo não rizosférico.

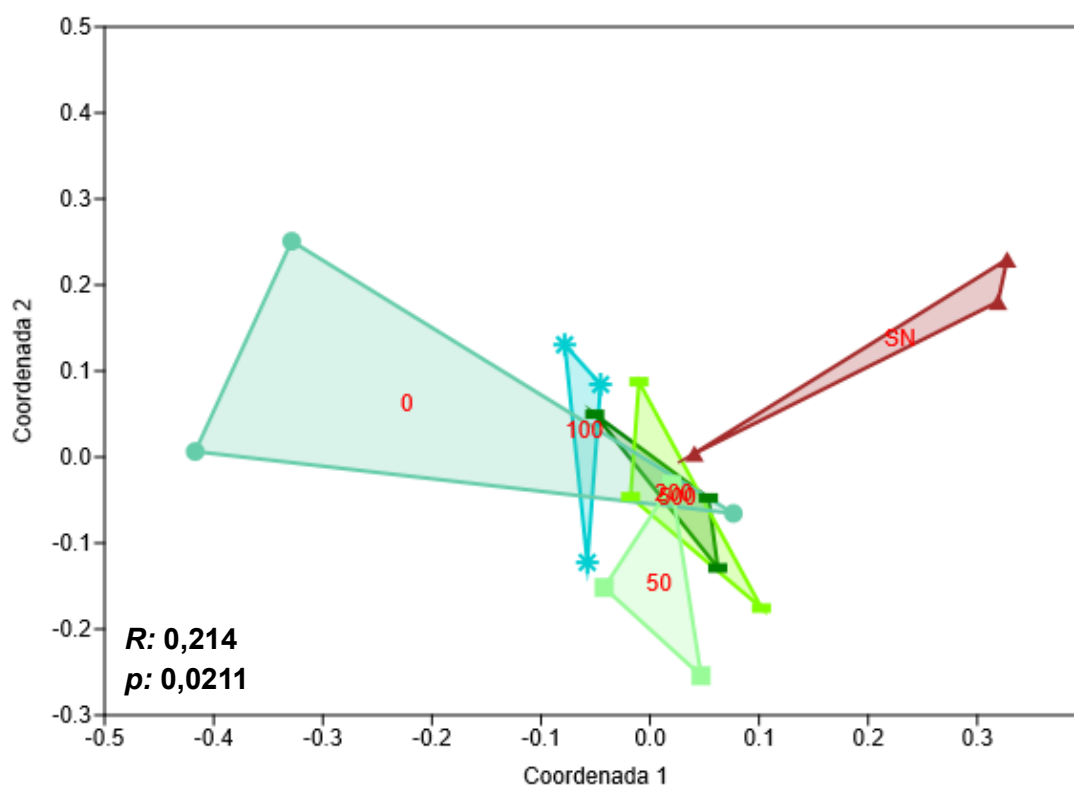


Figura 5. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade fúngica do genótipo BRS 310 do solo rizosférico de sorgo com diferentes doses de BiomaPhos®. Na figura, os pontos coloridos nos perfis NMDS são referentes aos tratamentos: ● dose 0 mL ha⁻¹, ■ dose 50 mL ha⁻¹, * dose 100 mL ha⁻¹, — dose 200 mL ha⁻¹ e ◆ dose 500 mL ha⁻¹.

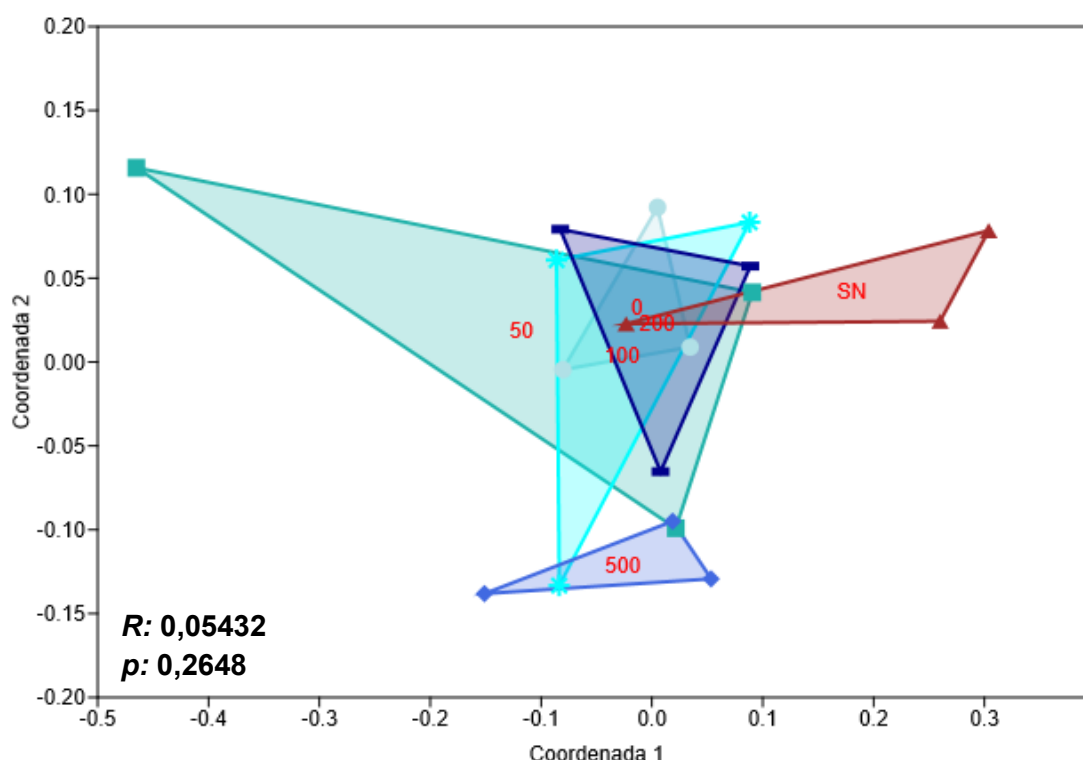


Figura 6. Perfil baseado no escalonamento não métrico (NMDS) utilizando a matriz de distância de Bray-Curtis para todos os tratamentos para análise da diversidade genética da comunidade fúngica do genótipo BRS 373 do solo rizosférico de sorgo com diferentes doses de BiomaPhos®. Na figura, os pontos coloridos nos perfis NMDS são referentes aos tratamentos: ● dose 0 mL ha⁻¹, ■ dose 50 mL ha⁻¹, * dose 100 ha⁻¹, ■ dose 200 mL ha⁻¹ e ◆ dose 500 mL ha⁻¹ e ▲ solo não rizosférico.

Os filos mais abundantes em todos os tratamentos foram Pseudomonadota, Bacillota e Actinomycetota (Figura 5). Não foi encontrada diferença significativa entre os filos considerando das doses de Bioinoculante para o genótipo BRS373 (Tabela 8). Já para o genótipo BRS310 foram encontradas diferenças significativas para Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota e Cyanobacteria para a dose 50 mL.ha⁻¹ de Bioinoculante (Tabela 9). Enquanto para o genótipo BRS373, foram encontradas diferenças significativas de acordo com a inoculação para os filos Actinomycetota,

Cyanobacteria, Chloroflexota para a dose 100 mL ha⁻¹ de Bioinoculante, enquanto para Aquificota e Campylobacterota foram encontradas diferenças significativas na dose 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante.

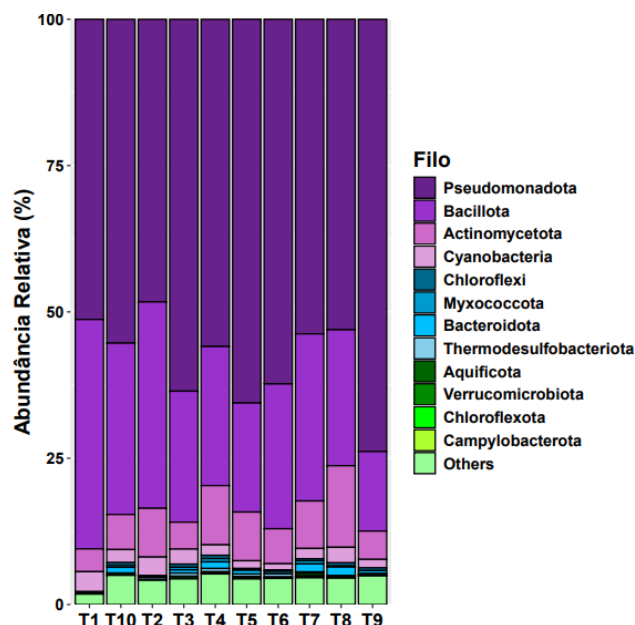


Figura 5. Abundância relativa dos filos Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Cyanobacteria, Chloroflexi, Myxococcota, Bacteroidota, Thermodesulfobacteriota, Aquificota, Verrucomicrobiota, Chloroflexota, Campylobacterota para os genótipos BRS310 e BRS373. Legenda: BRS310 (T1) 0, (T2) 50, (T3) 100, (T4) 200 e (T5) 500 mL ha⁻¹ de bioinoculante, BRS373 (T6) 0, (T7) 50, (T8) 100, (T9) 200 e (T10) 500 mL ha⁻¹ de bioinoculante.

Tabela 6. Análise de variância da abundância dos filos Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Cyanobacteria, Chloroflexi, Myxococcota, Bacteroidota, Thermodesulfobacteriota, Aquificota, Verrucomicrobiota, Chloroflexota, Campylobacterota e outros para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em solo de textura arenosa com diferentes doses de Bioinoculante.

GL		Quadrado médio												
		Pseudomonadota	Bacillota	Actinomycetota	Cyanobacteria	Chloroflexi	Myxococcota	Bacteroidota	Thermodesulfobacteriota	Aquificota	Verrucomicrobiota	Chloroflexota	Campylobacterota	Outros
Tratamento	9	20157	6280	1218,7	76,10	0,4556	5,11	34	5,51	2,67	0,40	0,46	0,4	190,46
Repetição	3	37039	29509	644	73,20	0,3667	14	42,8	7,47	9,07	0.80	0,37	0,4	26,76
Erro	27	22397	7517	753,6	43,33	0,5148	11,78	47,24	6,58	2,55	1,02	0,51	0,4	90,33

Tabela 7. Teste de média da abundância dos filos Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Cyanobacteria, Chloroflexi, Myxococcota, Bacteroidota, Thermodesulfobacteriota, Aquificota, Verrucomicrobiota, Chloroflexota, Campylobacterota e outros para genótipo BRS 310 e BRS 373 de sorgo em solo de textura arenosa com diferentes doses de Bioinoculante.

Bioinoculante	Pseudomonadota		Bacillota		Actinomycetota		Cyanobacteria		Chloroflexi		Myxococcota		Bacteroidota	
	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373
0	187,50 ^b	359,50 ^{ab}	143,25 ^{ab}	142,75 ^{ab}	14,25 ^c	34,50 ^{bc}	12,50 ^{abc}	6,00 ^c	0,00 ^a	1,50 ^a	0,50 ^a	2,50 ^a	0,00 ^a	0,00 ^a
50	297,25 ^{ab}	238,50 ^b	217,00 ^a	126,75 ^{ab}	51,25 ^{ab}	36,00 ^{bc}	19,50 ^a	7,75 ^{bc}	1,50 ^a	1,50 ^a	1,00 ^a	2,50 ^a	0,00 ^a	6,00 ^a
100	352,00 ^{ab}	294,25 ^{ab}	124,00 ^{ab}	128,75 ^{ab}	25,50 ^{bc}	77,25 ^a	14,25 ^{ab}	14,75 ^{ab}	3,00 ^a	3,00 ^a	2,50 ^a	1,00 ^a	3,00 ^a	8,00 ^a
200	297,00 ^{ab}	449,75 ^a	126,25 ^{ab}	82,75 ^b	53,75 ^{ab}	29,50 ^{bc}	9,50 ^{bc}	8,75 ^{bc}	3,00 ^a	3,00 ^a	3,00 ^a	0,00 ^a	6,00 ^a	3,00 ^a
500	311,50 ^{ab}	341,50 ^{ab}	88,50 ^b	180,75 ^{ab}	39,50 ^{bc}	37,00 ^{bc}	6,25 ^c	13,75 ^{abc}	1,50 ^a	3,00 ^a	0,00 ^a	2,00 ^a	3,00 ^a	6,00 ^a

Bioinoculante	Thermodesulfobacteriota		Aquificota		Verrucomicrobiota		Chloroflexota		Campylobacterota		Outros	
	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373
0	0,00 ^a	3,00 ^a	1,00 ^{ab}	1,00 ^{ab}	0,00 ^a	0,50 ^a	0,00 ^b	0,00 ^b	1,00 ^b	0,00 ^b	6,50 ^b	25,75 ^a
50	2,00 ^a	1,00 ^a	0,00 ^b	2,00 ^a	0,50 ^a	0,50 ^a	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	1,00 ^a	25,50 ^a	20,25 ^a
100	3,00 ^a	1,00 ^a	2,00 ^a	0,00 ^b	0,50 ^a	1,00 ^a	0,00 ^b	0,50 ^{ab}	0,00 ^b	0,00 ^b	24,25 ^a	25,00 ^a
200	3,00 ^a	1,00 ^a	1,00 ^{ab}	1,00 ^{ab}	1,00 ^a	0,50 ^a	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	27,75 ^a	29,75 ^a
500	2,00 ^a	0,00 ^a	0,00 ^b	2,00 ^a	1,00 ^a	0,50 ^a	1,00 ^a	0,00 ^{ab}	0,00 ^b	0,00 ^b	20,75 ^a	30,75 ^a

Médias seguidas pela mesma letra na apresentam diferença significativa ao nível de 0,05% de significância pelo teste LSD

ANÁLISE DE FOSFATASE E MICORRIZAÇÃO

Foi encontrada diferença significativa para fosfatase ácida, mas não para fosfatase alcalina em relação a genótipo (Tabela 8). No teste de médias realizado da atividade enzimática, não foi encontrada diferença significativa na atividade de fosfatase ácida e fosfatase alcalina para as diferentes doses de Bioinoculante (Tabela 9).

Tabela 8. Análise de variância da atividade enzimática dos genótipos de sorgo BRS 310 e BRS 373, crescidos em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.

	GL	Quadrado médio	
		Fosfatase Ácida	Fosfatase Alcalina
Genótipo	1	76562 .	6689
Dose	4	12161	3939
Erro	4	161161	6815
C.V.		26,97	27,24
Significância do teste LSD: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1			

Tabela 9. Atividade de fosfatase ácida e fosfatase alcalina dos genótipos de sorgo BRS 310 e BRS 373, crescidos em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.

Dose Bioinoculante mL ha ⁻¹	Fosfatase Ácida (ug NH4/h/fg)		Fosfatase Alcalina (ug NH4/h/fg)	
	BRS310	BRS373	BRS310	BRS373
0	350,16 ^{NA}	385,34 ^{NA}	298,45 ^{NA}	213,45 ^{NA}
50	435,52 ^{NA}	383,02 ^{NA}	285,23 ^{NA}	227,73 ^{NA}
100	343,20 ^{NA}	705,52 ^{NA}	233,45 ^{NA}	417,02 ^{NA}
200	350,34 ^{NA}	673,20 ^{NA}	298,27 ^{NA}	408,80 ^{NA}
500	440,52 ^{NA}	647,66 ^{NA}	270,77 ^{NA}	377,73 ^{NA}

Médias seguidas pela mesma letra na apresentam diferença significativa ao nível de 0,05% de significância pelo teste LSD.

As taxas de micorrização na dose 500 mL ha⁻¹ de Bioinoculante foram significativamente maiores tanto para o genótipo BRS310 quanto para BRS373 (Tabela 10).

Tabela 10. Taxa de colonização micorrízica (%) dos genótipos de sorgo BRS 310 e BRS 373, crescidos em solo arenoso com diferentes doses de Bioinoculante.

Dose Bioinoculante mL	Micorrização (%)	Micorrização (%)
ha⁻¹	BRS 310	BRS 373
0	11,67 ^b	11,00 ^b
50	8,67 ^b	10,67 ^b
100	12,00 ^b	11,67 ^b
200	11,33 ^b	10,33 ^b
500	27,00 ^a	21,00 ^a

Médias seguidas pela mesma letra na apresentam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste LSD.

A análise de PCA permitiu visualizar a separação dos dois genótipos de sorgo com base nas características de morfologia radicular no solo arenoso (Figura 7). O primeiro componente principal (CP1) explicou 52,9% enquanto o segundo componente principal (CP2) explicou 27,6% da variação (Tabela 11). A maioria das características apresentaram coeficientes e autovetores negativos, com exceção do WIDTH_MED em CP1 e ANG_TOP em CP1 e CP2 (Tabela 11).

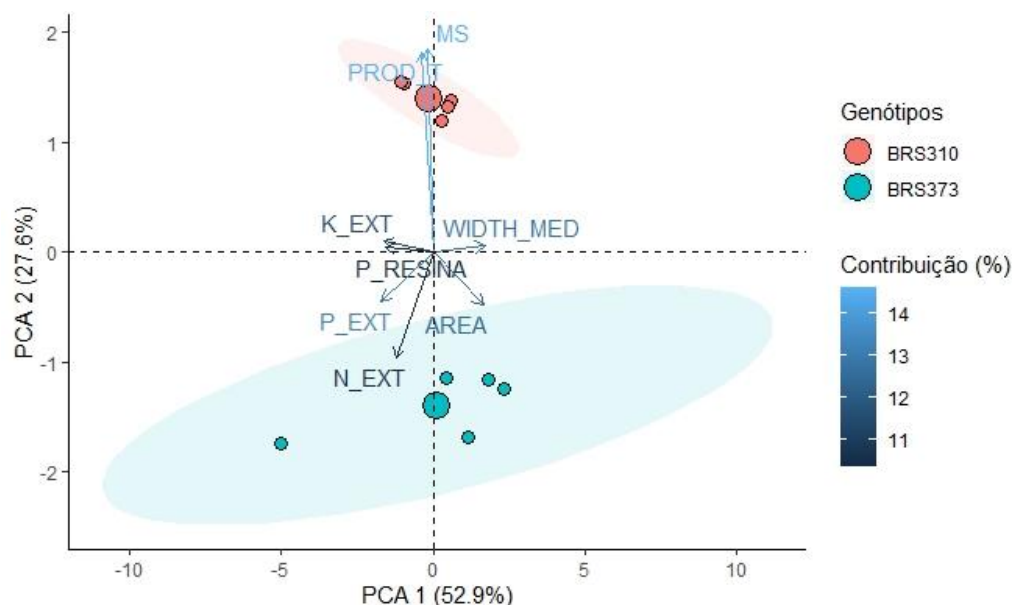


Figura 7. Análise de componentes principais para as características de morfologia radicular, peso seco e nutrientes dos genótipos BRS310 (●) e BRS373 (●) crescidos com diferentes doses de Bioinoculante em solo arenoso.

Tabela 11. Análise de componentes principais em solo arenoso para as características de massa seca, produtividade, P_resina, nitrogênio (ext), fósforo (ext), potássio (ext), AREA, WIDTH_MED e ANG_TOP.

Variáveis	CP1	CP2	Contribuição (%)
Massa Seca	-2,57	-3,61	40,93
Produtividade	-2,57	-3,61	40,5
P_Resina	-2,57	-3,61	13,51
Nitrogênio (ext)	-2,57	-3,61	17,63
Fósforo (ext)	-2,57	-3,61	16,11
Potássio (ext)	-2,57	-3,61	14,72
AREA	-2,57	-3,61	19,2
WIDTH_MED	6,14	-2,76	17,63
ANG_TOP	5,07	4,57	19,74
Autovalor	6,78	23,46	
Variância acumulada	52,90 %	27,6 %	

DISCUSSÃO

O desenvolvimento e o crescimento das plantas são influenciados pelas interações entre o genótipo vegetal, as características físicas do solo, os componentes ambientais presentes no solo e sua microbiota (WEN et al., 2019). As interações entre as raízes das plantas e os microrganismos podem impactar tanto o desenvolvimento da planta como a ciclagem de nutrientes (CANARINI et al., 2019), especialmente em solos arenosos, caracterizados por alta porosidade, alcalinidade, e baixos níveis de matéria orgânica e nutrientes em geral. Em relação às características relacionadas à morfologia da raiz e à presença de macronutrientes, foram observadas diferenças significativas em ambos os genótipos avaliados. Ao comparar as doses de Bioinoculante ambos os genótipos com a dose de 50 mL ha⁻¹ apresentou diferenças significativas para altura, fósforo extraído e magnésio extraído, enquanto potássio extraído apresentou diferença significativa apenas no genótipo BRS 373 (Tabela 3). O maior desenvolvimento radicular nos estágios iniciais de crescimento das plantas com a inoculação (SOUSA et al., 2021) podem contribuir para uma maior absorção de nutrientes e desenvolvimento do sorgo nos estágios finais.

A análise de componentes principais (PCA) para as características de morfologia radicular, peso seco e nutrientes dos genótipos BRS 310 e BRS 373, mostrou que os dois genótipos apresentaram uma separação clara (Figura 7). Sendo que para o genótipo BRS 310 as características que melhor explicaram a sua diferença foram produtividade e massa seca, enquanto as outras características contribuíram para o genótipo BRS 373. O genótipo BRS 310 apresenta um ciclo mais longo (120 dias), com menor produção de grãos (4,0 – 5,0 t ha⁻¹) quando comparado ao genótipo BRS 373, que possui um ciclo superprecoce (60 dias), e maior produção de grãos (4,0 – 6,0 t ha⁻¹) (EMBRAPA, 2016; SANTOS, 2004). Apesar da diferença de desenvolvimento, ambos foram coletados com o mesmo tamanho e época de florescimento, porém, quando foram analisadas as características relacionadas a arquitetura radicular e peso seco, as respostas significativas foram distintas em cada genótipo.

A análise da diversidade genética das comunidades microbianas do solo rizosférico mostrou diferenças significativas entre os tratamentos dos genótipos BRS

310 e BRS 373 (Figura 1). No caso da comunidade bacteriana do solo rizosférico do genótipo BRS 310, observou-se uma clara separação entre todas as doses de Bioinoculante aplicadas e o solo não rizosférico, com diferenças significativas (Figuras 2 e 3). Para a diversidade genética de AMF no solo rizosférico entre os genótipos BRS 310, BRS 373 e o solo não rizosférico, também foram encontradas diferenças significativas (Figura 4). Entretanto, não houve diferença significativa na diversidade genética de AMF no solo rizosférico do genótipo BRS 310 (Figuras 5 e 6). Foi identificada uma diferença na diversidade de FMA ao comparar os dois genótipos, mas não entre as diferentes doses de bioinoculante dentro de cada genótipo. No entanto, houve um aumento significativo na colonização por FMA na dose de 500 mL ha⁻¹ de bioinoculante para ambos os genótipos. As plantas micorrizadas estabelecem uma simbiose mutualista com as raízes finas, o que amplia a zona de depleção de nutrientes (JORHI et al., 2015; ZOU et al., 2019; LIMA, 2020). O uso do bioinoculante parece impactar não apenas a produção de raízes finas, a agregação e melhoria do solo, e a liberação de ácidos orgânicos que facilitam a disponibilidade de fósforo (SOUSA et al., 2021), mas também a taxa de colonização micorrízica. ADESEMOYE (2009) demonstrou que a co-inoculação de FMA e bactérias promotoras de crescimento com 90% da dose de fertilizante resultou em uma maior absorção de fósforo pelas plantas do que com a dose completa de fertilizante.

Tanto a fosfatase alcalina quanto a ácida, não apresentaram diferenças entre os tratamentos (Tabela 6). A fosfatase ácida apresentou valores mais altos do que a fosfatase alcalina, conforme já relatado na literatura, uma vez que a fosfatase ácida é produzida tanto por plantas quanto por microrganismos, enquanto a fosfatase alcalina é principalmente de origem microbiana (WAN et al., 2020). A análise da abundância relativa dos filos revelou que o Bioinoculante apresentou respostas distintas dependendo do genótipo e da dose utilizada. No genótipo BRS 310, foram encontradas diferenças significativas nos filos Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Cyanobacteria e outros na dose de 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante. Para o genótipo BRS 373, diferenças significativas foram observadas nos filos Actinomycetota, Cyanobacteria e Chloroflexota com a dose de 100 mL ha⁻¹, enquanto os filos Aquificota e Campylobacterota apresentaram diferenças significativas na dose de 50 mL ha⁻¹ de Bioinoculante. Ambos os genótipos mostraram diferenças

significativas para Actinomycetota e Cyanobacteria (Figura 5), embora com doses diferentes. O filo Actinomycetota está fortemente associado às bactérias responsáveis pela decomposição de nutrientes e matéria orgânica, provocando alterações estruturais na comunidade microbiana do solo. Por outro lado, o filo Cyanobacteria pode estar relacionado a bactérias fotossintéticas, que, em simbiose com a planta, recebem açúcares solúveis enquanto aumentam a fixação de N_2 , o que favorece o crescimento e desenvolvimento da planta (UZUN et al., 2022; ALVARÉZ et al., 2023). Ao analisar o gráfico de abundância relativa dos filos, observou-se que Pseudomonadota e Bacillota apareceram em maior quantidade (Figura 5). Resultados de Cohen et al. (2023) sugerem que solos arenosos são mais suscetíveis a mudanças em suas comunidades microbianas. Além disso, a abundância relativa de Pseudomonadota e Bacillota está fortemente associada ao aumento da atividade metabólica e da diversidade microbiana funcional do solo. Devido a diferença encontrada na comunidade bacteriana e fúngica, a abundância relativa dos filos, além da presença de fungos micorrízicos arbusculares, é possível que a inoculação possa ter contribuído para mudanças significativas na comunidade microbiana do solo, além de ter ajudado a aumentar a riqueza e diversidade em solos arenosos.

Os resultados indicaram que a inoculação pode provocar mudanças significativas na comunidade microbiana de solos arenosos, apresentando variações que são dependentes da dosagem de Bioinoculante aplicada e do genótipo de sorgo utilizado. O solo arenoso apresentou respostas significativas ao uso do Bioinoculante em características distintas, isso evidencia que as diferentes doses de Bioinoculante utilizadas, juntamente com os dois tipos genótipos, podem influenciar na responsividade do Bioinoculante. Sendo o solo arenoso conhecido por apresentar baixo teor de nutrientes e de matéria orgânica, qualquer fator que possa influenciar na responsividade do Bioinoculante é de suma importância. Por isso é essencial compreender e estudar mais a fundo, sendo necessários novos estudos e experimentos a respeito do solo arenoso e sua responsividade aos bioinoculantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATTINI, F.; GROLUND, M.; AGNOLUCCI, M.; GIOVANNETTI, M.; JAKOBSEN. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. **Scientific Reports**, p. 1-11, 2017.
- BITTENCOURT, C.D.; MESSIAS, M.; WENDLAND, A.; FERREIRA, E.P.B. Phosphate-solubilizing Inoculant Improves Agronomic Performance of Common Bean with Reduced Phosphate Fertilizer dose. **J Soil Sci Plant Nutr**, 2024 <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01943-2>
- BUCKSCH, A.; BURRIDGE, J.; YORK, L.; DAS, A.; NORD, E.; WEITZ, J.; LYNCH, J. Image-Based High-Throughput Field Phenotyping of Crop Roots. **Plant physiology**. 2014.
- CANÇADO, G.M.A.; VASCONCELOS, J.C.S.; OLIVEIRA-PAIVA, C.A.; CHRISTOFOLETTI, D.; SEVERINO, F.J.; PINTO JUNIOR, A.S.; MEDEIROS, G.; BARBOSA, L.A.F.; SPERANZA, E.A.; ANTUNES, J.F.G. Utilização de inoculante líquido solubilizador de fosfato formulado a base dos isolados de *Bacillus megaterium* (B119) e *Bacillus subtilis* (B2084) no plantio da cana-de-açúcar. Campinas/SP: Embrapa Agricultura Digital, 2021 (Boletim de Pesquisa).
- CAMPOLINO, M. L. **Comunidade Microbiana Rizosférica e Morfo-Fisiologia de Raízes de Genótipos de Milho e Sorgo Adubados com Fosfatos de Diferentes Reatividades e Doses de Fósforo**. 2022. 133 f. Tese (Doutorado em Bioengenharia) - Universidade Federal de São João Del-Rei, Sete Lagoas, 2022.
- CHRISTIAN, N., BEVER, J. D. Carbon allocation and competition maintain variation in plant root mutualisms. **Ecology and Evolution**, p. 5792- 5800, 2018.
- DAS, A.; SCHNEIDER, H.; BURRIDGE, J.; ASCANIO, A. K. M.; WOJCIECHOWSKI, T.; TOPP, C. N.; LYNCH, J. P.; WEITZ, J. S.; BUCKSCH, A. Digital imaging of root traits (DIRT): a high-throughput computing and collaboration platform for field based root phenomics. **Plant Methods**, v. 11, 2015.
- DE VRIEZE, J.; IJAZ, U. Z.; SAUNDERS, A. M. Terminal restriction fragment length polymorphism is an “old school” reliable technique for swift microbial community

- screening in anaerobic digestion. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, article 16818, 2018.
- GRANADA, C. E.; PASSAGLIA, L. M. P.; SOUZA, E. M. de; SPEROTTO, R. A. Is phosphate solubilization the forgotten child of plant growth-promoting rhizobacteria?. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 1-4, 2018.
- HAMMER, O., HARPER, D.A.T. & RYAN, P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. Disponível em: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm. Acesso em: 02 out 2023.
- HAO, H.; LI, Z.; LENG, C.; LU, C.; LUO, H.; LIU, Y.; WU, X.; LIU, Z.; SHANG, L.; JING, H. C. Sorghum breeding in the genomic era: opportunities and challenges. **Theoretical and Applied Genetics**, 2021.
- HORN, S.; HEMPEL, S.; VERBRUGGEN, E.; RILLIG, M. C.; CARUSO, T. Linking the community structure of arbuscular mycorrhizal fungi and plants: a story of interdependence?, **The ISME Journal**, p. 1400-1411, 2017.
- JORHI, A. K.; OELMÜLLER, R.; DUA, M.; YADAV, V.; KUMAR, M.; TUTEJA, N.; VARMA, A.; BONFANTE, P.; PERSSON, B. L.; STROUD, R. M.. Fungal association and utilization of phosphate by plants: success, limitations, and future prospects. **Frontiers in Microbiology**, 2015.
- KAISER, C.; KILBURN, M. R.; CLODE, P. L.; FUCHSLUEGER, L.; KORANDA, M.; CLIFF, J. B.; SOLAIMAN, Z. M.; MURPHY, D. V. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs direct root exudation. **New Phytologist**, p.1537–1551, 2015.
- KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, p.1-8, 2019.
- KARI, A.; NAGYMÁTÉ, Z.; ROMSICS, C.; VAJNA, B.; KUTASI, J.; PUSPÁN, I.; KÁRPÁTI, É.; KOVÁCS, R.; MÁRIALIGETI, K. Monitoring of soil microbial inoculants and their impact on maize (*Zea mays* L.) rhizosphere using T-RFLP molecular fingerprint method. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 233-244, 2019.

- LAMONTAGNE, M. G.; MICHEL, F. C. Jr.; HOLDEN, P. A.; REDDY, C. A. Evaluation of extraction and purification methods for obtaining PCR-amplifiable DNA from compost for microbial community analysis. **Journal Microbiology Methods**, v. 49, p. 255-264, 2001.
- LANDAU, E. C.; NETTO, D. A. M. Expansão potencial da produção de sorgo granífero no Brasil no sistema de rotação com soja considerando o zoneamento de risco climático 2015/16. **Embrapa Milho e Sorgo**, Sete Lagoas – MG, p. 1-27, 2015.
- LIMA, R. L. F. A. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, p. 1062-1079, 2020.
- LIU, D. Root developmental responses to phosphorus nutrition. **Journal of Integrative Plant Biology**, p. 1-26, 2021.
- LIU, W.; MARSH, T. L.; CHENG, H.; FORNEY, L. J. Characterization of microbial diversity by determining terminal restriction fragment length polymorphisms of genes encoding 16S rRNA. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 63, p. 4516-4522, 1997.
- MAHANTA, D.; RAIA, R. K.; DHARA, S.; VARGHESEC, E.; RAJAB, A.; PURAKAYASTHAA, T. J. Modification of root properties with phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhiza to reduce rock phosphate application in soybean wheat cropping system. **Ecological Engineering**, v. 111, p. 31-43, 2018.
- MENEZES, C. B. de; COELHO, A. M.; SILVA, A. F. da; SILVA, D. D. da; MENDES, S. M.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; RODRIGUES, J. A. S. É possível aumentar a produtividade de sorgo granífero no Brasil?. **CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO**, Lavras - MG, p. 106-139, 2018.
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; BINI, D.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SANTOS, F. C.; COTA, L. V.; SOUSA, S. M.; ALVES, V. M. C.; LANA, U. G.; SOUZA, F. F. Inoculante à base de bactérias solubilizadoras de fosfato nas culturas do milho e

- da soja (BiomaPhos®): dúvidas frequentes e boas práticas de inoculação. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 1-18, 2021.
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; SANTOS, F. C.; PINTO JUNIOR, A. S.; ALVES, V. M. C. Viabilidade Técnica e Econômica do BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas Culturas de Milho e Soja. **Embrapa Milho e Sorgo**, ed. 1, p. 1-21. 2020.
- OLIVEIRA-PAIVA, C.A.; BINI, D.; DE SOUSA, S.M.; RIBEIRO, V.P.; DOS SANTOS, F.C.; DE PAULA LANA, U.G.; DE SOUZA, F.F.; GOMES, E.A., MARRIEL, I.E. Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. **Front. Microbiol.** v. 15, p. 1426166, 2024. doi: 10.3389/fmicb.2024.1426166
- OLIVEIRA, I. F. **Caracterização da sorgoleona exsudada por genótipos de sorgo contrastantes quanto à eficiência na aquisição de fósforo e avaliação de sua relação com a eficiência simbiótica de fungos micorrízicos arbusculares.** 2019. 58 f. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia) - Universidade Federal de São João Del-Rei, Sete Lagoas, 2019.
- PALHARES, V. R.; DINIZ, G. F. D.; MARRIEL, I. E.; SANTOS, F. C.; GOMES, E. A.; OLIVEIRA, C. A. Atividade das enzimas fosfatases e β -glicosidase como indicadores da qualidade do solo na fazenda Trijunção, no marco entre os estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais no Brasil. **XXII Congresso Latinoamericano de Ciencia deL Suelo**, 2019.
- PASZKOWSKI, U. JAOVLEVA, L.; BOLLER, T. Maize mutants affected at distinct stages of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Plant Journal.** v. 47, p. 165-173, 2006.
- PATIL, P. M.; KULIGOD, V. B.; HEBSUR, N. S.; PATIL, C. R.; KULKARNI, G. N. Effect of phosphate solubilizing fungi and phosphorus levels on growth, yield and nutrient content in maize (*Zea mays*). **Karnataka Journal Agriculture Science**, v. 25, n. 1, p. 58-62, 2012.

- RAJAPAKSHA, R. M. C. P.; HERATH, D.; SENANAYAKE, A. P. SENEVIRATHNE, M. G. T. L. Mobilization of rock phosphate phosphorus through bacterial inoculants to enhance growth and yield of wetland rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 301-314, 2011.
- REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil Tillage Research**, p. 316-330, 2007.
- SENDEK, A.; KARAKOÇ, C.; WAGG, C.; DOMÍNGUEZ-BEGINES, J. Drought modulates interactions between arbuscular mycorrhizal fungal diversity and barley genotype diversity. **Scientific Reports**, p. 1-15, 2019.
- SOUSA, S. M.; OLIVEIRA, C. A.; ANDRADE, D. L.; CARVALHO, C. Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, p. 867-877, 2021.
- SOUZA, A.E.S.; FILLA, V.A.; SILVA, J.P.M.D.; BARBOSA JÚNIOR, M.R.; OLIVEIRA-PAIVA, C.A.; COELHO, A.P.; LEMOS, L.B. Application of *Bacillus* spp. Phosphate-Solubilizing Bacteria Improves Common Bean Production Compared to Conventional Fertilization. **Plants**. v. 12(22), p. 3827, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12223827>
- TABATABAI, M.A. Methods of Soil Analysis: Part 2 Microbiological and Biochemical Properties, 5.2. **SSSA Book Series**, p. 1-1121, 1994.
- TIQUIA, S. M.; ICHIDA, J. M.; KEENER, H. M.; ELWELL, D. L.; BURTT, E. H.; MICHEL, F. C. Bacterial community profiles on feathers during composting as determined by terminal restriction fragment length polymorphism analysis of 16S rDNA genes. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 67, n. 3, p. 412-419, 2005.
- TRABELSI, D.; CHERNI, A.; ZINEB, A. B.; DHANE, S. F.; MHAMDI, R. Fertilization of *Phaseolus vulgaris* with the Tunisian rock phosphate affects richness and structure of rhizosphere bacterial communities. **Applied Soil Ecology**, v. 114, p. 1-8, 2017.

- TRACHSEL, S., KAEPLER, S., BROWN, K., LYNCH, J. Shovelomics: High throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. **Plant and Soil** 341, 75-87, 2011.
- TROUVELOT, S.; VAN TUINEN, D.; HIJRI, M.; GIANINAZZIPEARSON, V. Visualization of ribosomal DNA loci in spore interphasic nuclei of glomalean fungi by fluorescence in situ hybridization. **Mycorrhiza**, v. 8, p. 203-206, 1999.
- TUINEN, M.; SIBLEY, C.G.; HEDGES, S.B. Phylogeny and biogeography of ratite birds inferred from DNA sequences of the mitochondrial ribosomal genes. **Molecular Biology and Evolution**, 1998.
- TURNER, S.; PRYER K, M.; MIAO, V. P W.; PALMER, J. D. Investigating deep phylogenetic relationships among cyanobacteria and plastids by small subunit rRNA sequence analysis. **J. Eukaryot. Microbiology** 46:327-338. 1999.
- USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 241-250, 2017.
- VELLOSO, C. C. V.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; GOMES, E. A.; LANA, U. G. de P.; CARVALHO, C. G.; GUIMARÃES, L. J. M.; PASTINA, M. M.; SOUSA, S. M. de. Genome-guided insights of tropical *Bacillus* strains efficient in maize growth promotion. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 96, n. 9, 2020.
- WAN, W.; QIN, Y.; WU, H.; ZUO, W.; HE, H.; TAN, J.; WANG, Y.; HE, D. Isolation and Characterization of Phosphorus Solubilizing Bacteria With Multiple Phosphorus Sources Utilizing Capability and Their Potential for Lead Immobilization in Soil. **Frontiers Microbiology**, v. 11, p. 1-15, 2020.
- ZHENG, Y.; CHEN, N.; YU, K.; ZHAO, C. The effects of fine roots and arbuscular mycorrhizal fungi on soil macropores. **Soil and Tillage Research**, v. 225, 2023.
- ZOU, Y.; ZHANG, D.; LIU, C.; WU, Q. Relationships between mycorrhizae and root hairs. **Pakistan Journal of Botany** 51, p. 727-733, 2019.

CONCLUSÃO GERAL

Os resultados demonstram que as bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) modulam características fisiológicas e microbiológicas de maneira diferenciada, dependendo da interação com o tipo de solo e o genótipo inoculado. No solo arenoso, a inoculação com o Bioinoculante mostrou-se altamente responsiva, promovendo benefícios desde as menores doses, o que sugere um impacto positivo na estrutura e funcionalidade da comunidade bacteriana local. Além disso, os diferentes genótipos de sorgo apresentaram respostas variáveis à inoculação, reforçando a necessidade de considerar tanto as características do solo quanto as particularidades genéticas das plantas ao definir estratégias de manejo biotecnológico.

A eficácia do Bioinoculante em distintos contextos edafoclimáticos destaca sua aplicabilidade, mas também evidencia a importância de aprofundar o conhecimento sobre a interação entre estirpes bacterianas, genótipos e condições do solo. Em solos arenosos, caracterizados por baixos teores de nutrientes e matéria orgânica, a otimização do uso do Bioinoculante pode representar uma estratégia crucial para melhorar a disponibilidade de nutrientes e a saúde do solo. Assim, novos estudos são fundamentais para refinar a definição da dosagem ideal e desenvolver abordagens mais eficientes para maximizar os benefícios da inoculação, contribuindo para avanços sustentáveis na agricultura.