



NZENGELE NZAMBI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BACTÉRIAS DO SOLO NA
SOLUBILIZAÇÃO DE POTÁSSIO A PARTIR DE FONOLITO**

**LAVRAS-MG
2025**

NZENGELE NZAMBI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BACTÉRIAS DO SOLO NA SOLUBILIZAÇÃO
DE POTÁSSIO A PARTIR DE FONOLITO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-graduação em Microbiologia Agrícola, área de concentração em Microbiologia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ederson da Conceição Jesus
Orientador

Prof. Dr. Jose Guilherme Guerra
Coorientador

**LAVRAS – MG
2025**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo(a) autor(a) através do Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA.

Nzambi, Nzengele.

Avaliação do potencial de bactérias do solo na solubilização de potássio a partir de fonolito / Nzengele Nzambi. 2024.

47 p. : il.

Orientador: Ederson da Conceição Jesus

Coorientador: Jose Guilherme Guerra

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Dissertação . 2. Tramites pós defesa. 3. Conclusão do curso. I. Jesus, Ederson da Conceição. II. Guerra, Jose Guilherme. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

NZENGELE NZAMBI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BACTÉRIAS DO SOLO NA SOLUBILIZAÇÃO
DE POTÁSSIO A PARTIR DE FONOLITO**

**EVALUATION OF THE POTENTIAL OF SOIL BACTERIA IN POTASSIUM
SOLUBILIZATION FROM PHONOLITH**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-graduação em Microbiologia Agrícola, área de concentração em Microbiologia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 30 de julho de 2024

Prof^o Dr Ederson da Conceição Jesus, UFLA
Dr^a Marcia Reed Rodrigues Coelho, EMBRAPA
Dr^o. Raul Castro Carriello Rosa, EMBRAPA

Prof. Dr. Ederson da Conceição Jesus
Orientador

Prof. Dr. Jose Guilherme Guerra
Coorientador

**LAVRAS - MG
2025**

DEDICATÓRIA

Dedico a minha mãe Maria Pembele e ao meu tio Clemente em memória que as suas almas descansam em paz que tudo fizeram para eu poder chegar até aqui.

A toda minha família em especial a minha esposa e os meus filhos.
Ao meu pai por me dar a vida, amor e carinho meus muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus todo poderoso por tudo que tem proporcionado na minha vida por me dar força e coragem para lutar em momentos em que eu poderia desistir, sempre esteve ao meu lado encher-me de poder e espírito de guerreiro para enfrentar e lutar contra tudo e me consagrar vencedor.

Ao meu tio Mpacá Mavungo Boduen por apostar em mim e apoiar nos meus estudos assim como a sua esposa Humberta Gomes Boduen meus muito obrigado por abrirem as suas portas e me receberem, e orientar para que eu pudesse alcançar os meus objetivos. Aos meus primos que sempre deram o seu apoio indireta ou diretamente o Kingani, Maria Micaela, Sany, Nanga, Simone, Dodó, Binho, Pezdy, Tereza, Mado, Yolanda, Gui- louran e a todos outros que não mencionei os nomes que Deus abençoe a todos vocês.

A Universidade Federal de Lavras por me dar oportunidade de cursar o Mestrado nas suas instalações, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Microbiologia Agrícola, aos professores: Victor Pylro, Eustáquio Dias, Cristina Ferreira, Whasley Duarte, Rosane Schwan e Disney Ribeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço a FAPERGI não esquecendo da Embrapa Agrobiologia (Seropédica Rio de Janeiro) que abriu as suas portas para a realização do meu projeto, ao APSSA Angola.

A toda equipe do Laboratório das Gramíneas da Embrapa; Veronica, William Takahashi, Thamires, Eduarda, Ana Karla, Alex, Ana Carolina Gabi, e a todos membros da Micro da Universidade de Lavras e aos meus colegas de sala que sempre partilhamos os momentos difíceis e bons que passamos. A todos os técnicos da Embrapa que deram seu apoio e orientações nos trabalhos práticos, nomeadamente o Wilson, Lúcio, Naldo, Itamar, Hernanes e ao pessoal da fazendinha muito obrigado.

E ao meu orientador Ederson da Conceição Jesus e ao coorientador Guilherme Guerra que Deus continue a iluminar os seus caminhos em especial nos seus projetos de pesquisa, não tenho palavras para descrever o tamanho da consideração, só Deus.

A minha esposa Leonor Baca, meus filhos Odmilson, Odmari e Odvaldo meus grandes amores sempre e sempre sem palavras para descrever muito grato.

RESUMO

Os microrganismos solubilizadores de potássio têm sido usados como bioinoculantes para promover o crescimento de diferentes espécies de cultura. Esse estudo teve como objetivo isolar, caracterizar e testar bactérias solubilizadoras de potássio a partir das rochas potássicas. As bactérias foram isoladas a partir do solo da rizosfera do tomateiro e de uma formação rochosa costeira do estado do Espírito Santo. Fez-se as diluições de 10^{-1} a 10^{-9} e essas foram inoculadas em placas usando os meios de cultura Aleksandrov e B & B suplementados com rocha potássica do tipo fonolito. Adicionalmente, utilizou-se bactérias do Centro de Recursos Johanna Döbereiner como fonte de potenciais microrganismos solubilizadores. Os organismos positivos para solubilização do K foram cultivados em cultura pura usando o meio DYGS e identificados por meio da análise das sequências do gene RNAr 16S. Dentre os gêneros positivos para solubilização estão: *Burkholderia*, *Paraburkholderia*, *Enterobacter*, *Ralstonia*, *Microbacterium*, *Nguyenibacter*, *Rhizobium*, *Bacillus* e *Arvibacter*. No teste de solubilização em meio líquido se destacaram a estirpe BR 11366 de *Paraburkholderia tropica* e dois isolados de *Rhizobium* sp. Ao contrário dos *Rhizobium*, os demais microrganismos não acidificaram o meio de cultivo, indicando a ação de um possível mecanismo distinto para solubilização do K. A inoculação de milho com as diferentes bactérias proporcionou um maior acúmulo de matéria seca na parte aérea quando cultivado em uma baixa dose de K (40 kg ha^{-1}). O desempenho das plantas inoculadas nessa condição se igualou ao de plantas sob alta dose de K (400 kg ha^{-1}). As estirpes NZ11, de *Arvibacter* sp., e BR 3487, de *P. tuberum*, se destacaram como as melhores promotoras do crescimento vegetal. Pode-se concluir que as bactérias avaliadas possuem a capacidade de promover o crescimento do milho sob condições de baixa disponibilidade de K e com potencial para futuros bioinoculantes.

Palavras-Chave: Microrganismos; solubilização de potássio; inoculação; bokashi.

ABSTRACT

Potassium-solubilizing microorganisms have been used as bioinoculants to promote the growth of different crop species. Our study aimed to isolate, characterize and test potassium-solubilizing bacteria from potassium rocks. The bacteria were isolated from tomato rhizosphere soil and a coastal rock formation in the state of Espírito Santo. Dilutions of 10^{-1} to 10^{-9} were made and these were inoculated on plates using Aleksandrov and B & B culture media supplemented with phonolite-type potassium rock. Additionally, bacteria from the Johanna Döbereiner Resource Center were used as a source of potential solubilizing microorganisms. Organisms positive for K solubilization were grown in pure culture using DYGS medium and identified through analysis of the 16S rRNA gene sequences. Among the positive genera for solubilization are: *Burkholderia*, *Paraburkholderia*, *Enterobacter*, *Ralstonia*, *Microbacterium*, *Nguyenibacter*, *Rhizobium*, *Bacillus*, and *Arvibacter*. The BR 11366 strain of *Paraburkholderia tropica* and two isolates of *Rhizobium* sp. stood out in the liquid solubilization test. Unlike *Rhizobium*, the other microorganisms did not acidify the culture medium, indicating the action of a possible different mechanism for K solubilization. Inoculation with the different bacteria provided a greater accumulation of dry matter in the shoot of millet when cultivated at a low dose of K (40 kg ha^{-1}). The performance of plants inoculated under this condition was similar to that of plants under a high dose of K (400 kg ha^{-1}). Strains NZ11, from *Arvibacter* sp., and BR 3487, from *P. tuberum*, stood out as the best plant growth promoters. We conclude that the evaluated bacteria have the ability to promote millet growth under conditions of low K availability and have potential for future bioinoculants.

Keywords: Microorganisms; potassium solubilization; inoculation; bokashi

IMPACTOS SOCIAIS, TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E CULTURAIS

O potássio é um dos nutrientes essenciais para a melhoria da saúde e produtividade das culturas, sendo um macronutriente de vital importância na agricultura a sua aplicação torna-se imprescindível na produção agrícola. Por ser um mineral de difícil absorção pelas plantas devido a sua forma no solo, o principal método utilizado por agricultores para suprir a sua necessidade de cultura é a aplicação de fertilizantes potássicos. Em contrapartida, a utilização excessiva de agroquímicos e fertilizantes tem se intensificado, apresentando desafios significativos para a saúde do solo e para a produção sustentável. Mediante este contexto o nosso estudo visa a utilização de meios alternativos a estes usados por agricultores a fim de proporcionar melhoria do solo e ao mesmo tempo garantir a produção agrícola com uso de microrganismos solubilizadores de minerais que são capazes de extrair estes minerais do solo e torna-los disponíveis às plantas. Do ponto de vista tecnológico e/ou inovação trata-se de um método que traz melhorias na agricultura moderna apesar de ser ainda pouco aplicado várias pesquisas estão sendo desenvolvidas por vários pesquisadores tanto no Brasil como em alguns países da Ásia com o objetivo de melhorar os solos destas regiões. No aspecto econômico é uma prática além de sustentável é muito econômica e acessível comparado com a aplicação de fertilizantes químicos. Estudos feitos no Brasil por pesquisadores da Embrapa com agricultores no Rio usando biofertilizantes a base de microrganismos foi de custo baixo comparado com fertilizantes químicos. De ponto de vista cultural necessita-se de mais divulgação a fim de tornar esta prática mais conhecida aos agricultores de média escala e fazendeiros na implementação desta tecnologia, já no caso de Angola pouco se fala desta nova prática espero que no futuro os agricultores locais se envolvam nesta prática massivamente.

SOCIAL, TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND CULTURAL IMPACTS

Potassium is one of the essential nutrients for improving crop health and productivity. It is a macronutrient of vital importance in agriculture and its application becomes essential in agricultural production. Since it is a mineral that is difficult for plants to absorb due to its form in the soil, the main method used by farmers to meet their crop needs is the application of potassium fertilizers. On the other hand, the excessive use of agrochemicals and fertilizers has intensified, presenting significant challenges to soil health and sustainable production. In this context, our study aims to use alternative means to those used by farmers in order to provide soil improvement and at the same time guarantee agricultural production with the use of mineral-solubilizing microorganisms that are capable of extracting these minerals from the soil and making them available to plants. From a technological and/or innovation point of view, this is a method that brings improvements to modern agriculture, although it is still little applied. Several studies are being developed by several researchers both in Brazil and in some Asian countries with the aim of improving the soils in these regions. From an economic perspective, this practice is not only sustainable, but also very economical and accessible compared to the application of chemical fertilizers. Studies conducted in Brazil by researchers from Embrapa with farmers in Rio using microorganism-based biofertilizers were found to be low-cost compared to chemical fertilizers. From a cultural perspective, more publicity is needed to make this practice better known to medium-scale farmers and farmers implementing this technology. In the case of Angola, little is said about this new practice. I hope that in the future local farmers will become involved in this practice on a massive scale.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Compostos fermentados farelados tipo bokashi	14
2.2 Potássio	14
2.3. Fontes de potássio no Solo	15
2.4. Reservas de Potássio no Mundo	15
2.5. Importância do Potássio nas Plantas	15
2.6. Fertilizantes que Fornecem o Potássio	16
2.7. O Uso de Adubação Potássica no Mundo	17
2.8. Microrganismos Solubilizadores de Potássio	17
2.9. Mecanismos de Solubilização	19
3. OBJETIVOS	21
3.1. Objetivo Geral	21
3.2. Objetivos específicos	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Experimento 1: Capacidade de solubilização de K <i>in vitro</i>	22
4.1.1. Isolamento de microrganismos	22
4.1.2 Avaliação <i>in vitro</i> do potencial de solubilização de potássio das bactérias	25
4.1.3 Caracterização molecular dos microrganismos estudados	25
4.1.3 Experimento 2: Solubilização de K em casa de vegetação.	26
4.1.4 Análise estatística	27
5 RESULTADOS	28
5.1 Isolamento e caracterização morfológica e molecular dos microrganismos	28
5.2 Solubilização de rocha potássica em meios sólido e líquido	30
5.3 Inoculação do milho com bactérias solubilizadoras de K sob doses baixa e alta de K na forma de fonolito	32
6. DISCUSSÃO	37
7. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Árvore filogenética construída com o gene RNAr 16S de isolados de bactérias solubilizadoras de K isoladas da rizosfera do tomateiro e de plantas saxícolas. A árvore foi construída com o algoritmo neighbor-joining, a distância de Kimura 2 parâmetros e parâmetro gama 0,56. Valores de bootstrap (2.000 replicatas) acima de 50% são apresentados. A barra indica o número de substituição de bases por sítio..... 29

Figura 2-Índice de solubilização de K dos isolados bacterianos das rizosferas do tomateiro e plantas saxícolas (códigos NZ) e do Centro de Recursos Johanna Döbereiner (códigos BR) nos meios sólidos B&B (BB) e Aleksandrov (ALMS) sólidos 31

Figura 3- Potássio solubilizado (ppm) e variação do pH em meio B&B líquido (pH 6,5) inoculado por 15 dias com os treze isolados com o melhor índice de solubilização..... 32

Figura 4- Massa seca da parte aérea de plantas de milho inoculadas com solubilizadoras de K em condições de baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados apresentados são independentes da dose, ou seja, as médias representam a média das repetições de todos os tratamentos inoculados com um dado isolado bacteriano, independentemente de estar ou não em baixa ou alta dose de K. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. CNI: controle não inoculado. 34

Figura 5- Massa seca das raízes de plantas de milho inoculadas com bactérias solubilizadoras de K em condições de baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados apresentados são independentes da dose, ou seja, as médias representam a média das repetições de todos os tratamentos inoculados com um dado isolado bacteriano, independentemente de estar ou não em baixa ou alta dose de K. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. CNI: controle não inoculado. 35

Figura 6- Massa seca da parte aérea de plantas de milho inoculadas com bactérias solubilizadoras de K em condições de baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados são apresentados por dose. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade..... 36

Figura 7- baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados são apresentados por dose. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. 36

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1- Estirpes de *Paraburkholderia* spp. utilizadas nos testes de solubilização de K e no experimento de inoculação em planta. As informações apresentadas foram disponibilizadas no sistema Alelomicro..... 24
- Tabela 2- Resumo da análise de variância das variáveis massa seca da parte aérea e massa seca das raízes de plantas de milho inoculadas com bactérias solubilizadoras de potássio sob baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹)...... 33

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população humana, aliado à redução das áreas agrícolas utilizadas para fins não dedicados à agricultura, impõe uma pressão crescente pela necessidade de aumentar a produtividade das terras aráveis disponíveis (Jini *et al.*, 2023). Em contrapartida, a utilização excessiva de agroquímicos e fertilizantes tem se intensificado, apresentando desafios significativos para a saúde do solo e para a produção sustentável. Atualmente, o Brasil ocupa a posição de quarto maior consumidor global de fertilizantes, ficando atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos, com uma participação de 8,2% do mercado. No que diz respeito ao potássio (K), o Brasil é o segundo maior consumidor e o principal importador, uma vez que a produção interna é bastante limitada, com a agricultura importando cerca de 96% dos fertilizantes potássicos utilizados (Associação Nacional Para Difusão de Adubos, 2019). A produção de fertilizantes nitrogenados e fosfatados no Brasil ainda permanece aquém da demanda, enquanto a maior parte, senão toda, da necessidade de potássio é suprida por meio de importações, devido à escassez de minerais de potássio economicamente viáveis. Globalmente, os fertilizantes potássicos representam apenas 18% do consumo total de fertilizantes de N, P e K (Shirale *et al.*, 2019). Não obstante, quantidades significativas de P e K estão presentes em formas não trocáveis no solo; o K, embora constitua aproximadamente 2,5% da litosfera, apresenta concentrações de K solúvel disponíveis nos solos que são geralmente muito baixas (Parmar; Sindhu, 2013), com mais de 90-98% das reservas de K no sistema do solo encontrando-se em formas não trocáveis (Sattar *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a utilização de compostos farelados fermentados, inoculados com microrganismos, na agricultura oferece diversos benefícios, proporcionando a adição equilibrada de macro e micronutrientes ao solo, além de revitalizá-lo através da incorporação de microbiota durante o processo de fertilização. Esses compostos são frequentemente empregados na agricultura para a fertilização de hortaliças, considerando os variados níveis tecnológicos e as diferentes matérias-primas que podem ser utilizadas na sua elaboração (Goulart, 2023).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Compostos fermentados farelados tipo bokashi

O bokashi é um fertilizante amplamente aplicado na fertilização de hortaliças, especialmente em sistemas de agricultura ecológica. Este composto é eficaz na oferta equilibrada de macro e micronutrientes, além de microrganismos que são incorporados durante sua preparação, através de um processo de inoculação. No Brasil, sua utilização começou no final da década de 1980, promovida por imigrantes japoneses, que são considerados os pioneiros dessa técnica (Siqueira e Siqueira, 2013).

Os benefícios do uso de compostos fermentados em comparação aos demais fertilizantes orgânicos permitidos na agricultura orgânica estão intimamente ligados à revitalização do solo, possibilitada pela microbiota adicionada durante o processo de fertilização (Siqueira e Siqueira, 2013). Durante o processo fermentativo, os microrganismos desempenham um papel crucial na diminuição do pH do meio, devido à alta produção de ácido lático, que confere um odor agradável, semelhante ao aroma gerado durante a panificação (Pian, 2019). Em solos, especialmente nas áreas potencialmente degradadas, a constante reposição de microrganismos, associada à matéria orgânica, pode contribuir de maneira significativa para o aumento da produtividade das culturas.

2.2 Potássio

O potássio é um dos nutrientes essenciais para a melhoria da saúde e produtividade das culturas. Ele desempenha várias funções vitais na manutenção de práticas agrícolas sustentáveis, incluindo o aumento da resistência das plantas a períodos de seca, a redução da evapotranspiração, o suporte aos processos de fotossíntese, a melhoria da translocação de açúcares e amido, além da elevação do teor de proteínas nas plantas, contribuindo também para a diminuição da incidência de doenças nas lavouras (Olaniyan *et al.*, 2023). A disponibilidade de K solúvel no solo é bastante limitada, sendo que os principais reservatórios de potássio são a areia, o silte e a argila, com feldspato e mica como os minerais mais recorrentes contendo potássio. Em relação à sua disponibilidade no solo, ela se divide em: K em solução, K trocável e K não trocável ou mineral (K em estrutura de mineral primário). Essas formas existem em um equilíbrio dinâmico, regido pelas propriedades de troca, composição mineral e taxa de intemperismo do solo. A fim de reduzir o uso de fertilizantes minerais, que apresentam efeitos adversos sobre a saúde das plantas e a qualidade do solo, os biofertilizantes podem emergir

como uma alternativa viável para a promoção de práticas agrícolas sustentáveis (Kour *et al.*, 2020).

2.3. Fontes de potássio no Solo

O potássio é o terceiro nutriente mais requisitado pelas plantas (Dhillon *et al.*, 2019), desempenhando um papel chave na regulação de processos bioquímicos, fisiológicos e fotossintéticos. De acordo com Mouhamad *et al.* (2016), rochas ígneas possuem teores de potássio superiores aos encontrados em rochas sedimentares. O reservatório do solo contém quantidades variáveis de minerais portadores de potássio, sendo os silicatos de alumina primários os mais abundantes (Rawat *et al.*, 2016). Os silicatos de alumina primária incluem feldspato, mica, biotita, moscovita e nefelina. Vários pesquisadores, como Basak *et al.* (2017), Mancuso *et al.* (2014) e Mohammed *et al.* (2013), identificaram feldspato e mica como os principais componentes de potássio no solo.

O potássio não trocável, por sua vez, atua como reserva e está associado a minerais de argila 2:1 (Mouhamad *et al.*, 2016). Os argilominerais caracterizados por uma folha octaédrica comprimida entre duas folhas tetraédricas são classificados como argilominerais 2:1 (Ghadiri, 2015). Os íons trocáveis localizados nas superfícies de troca catiônica compreendem a terceira forma de K, enquanto a quarta forma é o potássio prontamente disponível na solução do solo (Yadav; Sidhu, 2016). Apenas 0,1-0,2% dos minerais de K estão disponíveis para uso vegetal (Rawat *et al.*, 2016).

2.4. Reservas de Potássio no Mundo

O potássio é um nutriente mineral de grande relevância para as plantas, desempenhando funções vitais desde a proteção das culturas até processos metabólicos (Das *et al.*, 2022). Sua produção global se concentra em cinco países, a saber, Rússia, Canadá, Bielorrússia, Israel e Alemanha, que detêm as maiores reservas segundo dados da ANM de Sergipe (2016).

2.5. Importância do Potássio nas Plantas

O K é essencial para diversos processos de desenvolvimento vegetal (Cakmak, 2010). Ele melhora a saúde, o crescimento e o desenvolvimento das plantas; aumenta a resistência a enfermidades; melhora a qualidade da colheita e prolonga a vida útil dos produtos agrícolas. Além disso, K fortalece a capacidade das plantas em lidar com estresses, como geadas, secas, pragas, doenças, acamamento e problemas de drenagem, além de promover a fotossíntese,

resultando em formação de carboidratos, óleos, gorduras e proteínas, regulando também a absorção de água pelas raízes e o desenvolvimento do sistema radicular (Shirale *et al.*, 2019). Comparado a outros nutrientes essenciais, como nitrogênio e fósforo, o K não é componente estrutural das plantas, mas é crucial para o metabolismo vegetal e as relações hídricas (Hamid; Bashir, 2019). De acordo com Shirale *et al.* (2019), o potássio atua como ativador enzimático, regulando também o pH das reações enzimáticas e a produção de substâncias orgânicas. O K ainda controla a abertura e fechamento estomatal, influenciando diretamente a regulação do turgor, transpiração e ciclagem de nutrientes nas plantas (Shirale *et al.*, 2019). A ativação enzimática mediada pelo K também auxilia na produção de trifosfato de adenosina (ATP) (Hasanuzzaman *et al.*, 2018).

A aplicação de K demonstrou resultados significativos na produtividade e na melhoria das características produtivas de várias culturas ao redor do mundo. Por exemplo, Bhosale *et al.* (2017) relataram que a aplicação de K, em combinação com N, resultou em um incremento de 32,44% no peso do fruto da melancia em solos lateríticos na região de Konkan, Índia. Na Bangladesh, a adição de K aumentou o rendimento de frutos de tomate em até 50,49% e o número de frutos por planta em 41,58% em solos franco-argilosos do Trato de Madhupur (Sultana *et al.*, 2015). Em outro estudo na região costeira de Bangladesh, foi observada uma elevação de 26,30% na altura da planta de juta branca e de 35,10% na produção de fibra (Piya *et al.*, 2019). O uso de fertilizantes K resultou em um aumento de 32,1% na produtividade do milho no Nordeste da China entre 2005 e 2012 (Jiang *et al.*, 2018). No Paquistão, Ali *et al.* (2020) também observaram aumentos de 18,33% na altura da planta e 33,91% no comprimento da espiga de milho, devido à aplicação de fertilizante K na Universidade de Sargodha (UOS). Pesquisas conduzidas na estação de pesquisa do Hamelmalo Agricultural College, na Eritreia, revelaram um aumento de 30,72% na produção de caule aéreo por planta de batata (Zezelew *et al.*, 2016). Hussain *et al.* (2021) registraram aumento de 22,5–24,19% na altura da planta e um incremento de 3,3% na matéria seca da planta de algodão em um experimento de campo no Central Cotton Research Institute, em Multan, Paquistão. Em suma, todos esses estudos confirmam que a aplicação de fertilizante K melhora o crescimento e a rendimento de várias culturas.

2.6. Fertilizantes que Fornecem o Potássio

Entre os fertilizantes que fornecem potássio, destacam-se o cloreto de potássio (KCl), o nitrato de potássio (KNO₃), o sulfato de potássio (K₂SO₄), o carbonato de potássio (K₂CO₃) e o fosfato de potássio dibásico (K₂HPO₄) (Kafkafi *et al.*, 2001). Além desses, outras fontes de

potássio incluem micas, illita, feldspato e verdete (Bagyalahshmi *et al.*, 2017). Outras fontes adicionais de K incluem moscovita, pó de illita, montmorilonita, caulinita, feldspato potássico, biotita, resíduos de mica, bentonita, cinzas de madeira e silicato de alumínio (Meena *et al.*, 2016).

2.7. O Uso de Adubação Potássica no Mundo

A aplicação de fertilizantes minerais potássicos solúveis tem sido fundamental para garantir a produção de alimentos em nível global, visto que este macronutriente é imprescindível para as plantas, desempenhando diversas funções (Mahmud *et al.*, 2021). Os fertilizantes minerais solúveis representam a totalidade dos fertilizantes aplicados na agricultura, especialmente na agricultura industrial, que exige grandes extensões de terra para responder ao aumento da demanda alimentar. Assim, será necessário intensificar a agricultura de maneira sustentável para alimentar a crescente população mundial. Muitas terras agrícolas carecem de quantidade adequada de um ou mais nutrientes essenciais, resultando em crescimento abaixo do ideal das plantas (Haube *et al.*, 2012). Estudos realizados por Dhillon *et al.* (2019) e Römheld e Kirkby (2010) apud Olaniyan *et al.* (2022) relataram deficiências globais de K na maioria dos solos. Os mesmos afirmaram que na China, um quarto dos solos aráveis e três quartos dos solos cultiváveis dedicados ao arroz apresentam deficiência de K. Também encontraram deficiências de K na produção de trigo na região sudoeste da Austrália. Além disso, 72% da área agrícola na Índia apresenta deficiência de K, sendo está um nutriente limitante na maioria dos solos de alguns países da África Subsaariana, incluindo Nigéria, Ruanda, Quênia e Serra Leoa (Olaniyan *et al.*, 2022).

Globalmente, o uso de fertilizantes potássicos tem crescido para atender à demanda crescente na agricultura e produção de alimentos. Em países asiáticos, uma prática relevante para aumentar a produtividade tem sido a utilização de fertilizantes K em combinação com microrganismos solubilizadores de K, em resposta à baixa fertilidade da maioria dos solos (Sattar *et al.*, 2019 apud Embrapa 2021). Nos últimos anos, numerosos artigos publicados têm focado no estudo desses microrganismos, com a maioria das pesquisas concentradas na Ásia. (Warnakulasooriya *et al.*, 2025; Bilal *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022; Kour *et al.*, 2020; Soumare *et al.*, 2023).

2.8. Microrganismos Solubilizadores de Potássio

A reposição de potássio no solo, especialmente na agricultura familiar, ainda representa um desafio importante, visto que essa necessidade é suprida predominantemente por meio de

fertilizantes (Kour *et al.*, 2020). A estratégia comumente utilizada pelos agricultores para superar a deficiência de potássio é a aplicação de fertilizantes minerais solúveis de potássio. Contudo, a oferta desses fertilizantes enfrenta limitações em decorrência de seus altos custos e da baixa eficiência em produção.

O uso indiscriminado de fertilizantes minerais pode resultar em degradação do solo, redução da fertilidade e eliminação de microrganismos benéficos, além da contaminação da água e do meio ambiente (Meena *et al.*, 2015) e de tornar as culturas mais suscetíveis a doenças e acúmulo de poluentes (Sharma & Chetani, 2017), afetando a qualidade nutricional e, em última análise, o rendimento das culturas (Bashir *et al.*, 2017; Mahmud *et al.*, 2021). Assim, esforços colaborativos estão aumentando em busca de alternativas economicamente viáveis e ecologicamente responsáveis para repor o potássio do solo (Bashir *et al.*, 2017; Etesami *et al.*, 2017; Macik *et al.*, 2020).

A pesquisa e utilização de microrganismos solubilizadores de potássio, como bactérias e fungos, na forma de biofertilizantes, é uma alternativa proposta para reduzir a dependência de agroquímicos, especialmente fertilizantes solúveis de potássio (Hamid; Bashir, 2019). Os biofertilizantes consistem em substâncias que contêm microrganismos vivos ou seus inóculos e esporos e apresentam propriedades benéficas para as plantas (Macik *et al.*, 2020), agindo principalmente sobre sementes, raízes ou no solo (Hamid; Bashir, 2019). Os biofertilizantes desempenham um papel fundamental na manutenção da fertilidade do solo, melhorando a qualidade, saúde e estado nutricional das plantas, além de favorecer o rendimento das culturas na agricultura sustentável. Eles também impactam positivamente a estrutura do solo, protegem as plantas contra doenças e pragas, e favorecem uma relação eficiente entre planta e água (Hamid; Bashir, 2019; Macik *et al.*, 2020).

Os biofertilizantes são fitoestimulantes que promovem o crescimento e desenvolvimento das plantas ao aprimorar a absorção de nutrientes do solo. Isso pode ser atribuído ao aumento da fixação de nitrogênio, excreção de fitormônios, supressão de fitopatógenos, tolerância ao estresse, remediação de poluentes e solubilização de potássio e fósforo (Macik *et al.*, 2020; Adetunji *et al.*, 2022). O uso de bactérias solubilizadoras de potássio como biofertilizantes mostra-se promissor para melhorar a produtividade e a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Bashir *et al.*, 2017; Hamid; Bashir, 2019).

Os microrganismos da rizosfera, especialmente os solubilizadores de K, como fungos micorrízicos arbusculares e várias espécies de bactérias e fungos, podem constituir uma

alternativa eficiente e sustentável para suprir a demanda de K e melhorar as culturas (Soumare *et al.*, 2022). A inoculação de bactérias solubilizadoras de potássio, isoladamente ou em combinação com outros microrganismos promotores de crescimento, como solubilizadores de fósforo, fixadores de nitrogênio e micorrizas, aumenta a disponibilidade e absorção de potássio no solo, promovendo, assim, o crescimento das plantas (Ahmad *et al.*, 2016; Meena *et al.*, 2016; Hamid; Bashir, 2019; Kour *et al.*, 2020).

Os microrganismos do solo exercem influência significativa sobre a fertilidade do solo, impactando diversos processos por meio de mecanismos como decomposição, imobilização e mineralização. Eles desempenham um papel crucial no ciclo natural de K, especialmente os solubilizadores de potássio, que têm a capacidade de solubilizar minerais que contêm potássio, como muscovita, mica, ilita, biotita, feldspato e ortoclásio, convertendo o K em formas solúveis disponíveis para as plantas (El-Egami *et al.*, 2024). A utilização de microrganismos solubilizadores de potássio (KSMs) como biofertilizantes pode elevar a produtividade das culturas e a disponibilidade de nutrientes (Eteessami *et al.*, 2017).

2.9. Mecanismos de Solubilização

Diversos mecanismos são adotados pelos microrganismos solubilizadores de K para sua solubilização, incluindo produção de ácidos, enzimólise e complexação por meio de polissacarídeos extracelulares (Olaniyan *et al.*, 2022; Ahmad *et al.*, 2016; Satar *et al.*, 2019). Métodos de formação de complexos metal-orgânicos podem enfraquecer as estruturas reticulares e liberar K na solução do solo (Ahmad *et al.*, 2016; Satar *et al.*, 2019; Hamid; Bashir, 2019). A secreção de polissacarídeos e a formação de biofilmes em superfícies minerais também são estratégias utilizadas (Etesami *et al.*, 2017; Satar *et al.*, 2019).

Um dos mecanismos adotados para a liberação de potássio é a produção de ácidos orgânicos, como ácido oxálico, tartárico, cítrico, malônico, láctico e glicólico (Kumar *et al.*, 2016; Meena *et al.*, 2016). Esses ácidos dissolvem diretamente os minerais de potássio, contribuindo para a liberação lenta de substâncias que se tornam prontamente disponíveis (Raji e Thangavelu, 2021). Este processo pode também incluir a redução do pH no solo rizosférico, acelerando a solubilização do mineral que contém potássio, tornando-o acessível para absorção pelas plantas (Sattar *et al.*, 2019).

A inoculação de PGPMs ou sua aplicação indireta por meio de materiais compostos regula a nutrição das plantas, aumentando a absorção dos íons de potássio (K⁺) em relação aos íons de sódio (Na⁺), mesmo sob condições de estresse salino, garantindo a mobilização

adequada de nutrientes para uso ideal em diferentes regiões agroclimáticas (Kumar *et al.*, 2015; Meena *et al.*, 2015). Um estudo realizado por Han *et al.* (2006) demonstrou que, em experimento com a série Aquepts em solo oriundo de Chinju, província de Kyungnam, Coréia do Sul, a coinoculação de *Bacillus mucilaginosus*, uma bactéria solubilizadora de fósforo, e *B. megaterium* resultou em um aumento na disponibilidade de fósforo e potássio, melhorando o crescimento de pepino e pimenta. Similarmente, a coinoculação entre *Bacillus mucilaginosus* e a bactéria fixadora de nitrogênio *Azotobacter chroococcum*, combinada com resíduos de mica, resultou em um maior acúmulo de biomassa e aquisição de nutrientes em uma família Alfisol de Typic Haplustalf, na região de Hazaribagh, Jharkhand, Índia (Basak; Biswas, 2010). Vários estudos têm demonstrado que diferentes grupos de microrganismos, tanto bactérias quanto fungos, estão envolvidos na solubilização de minerais de K no sistema do solo (Kour *et al.*, 2020; Gouda *et al.*, 2018). Rizobactérias como *Bacillus edaphicus*, *B. circulans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Paenibacillus* sp., bem como fungos como *Aspergillus terreus*, *Glomus mosseae*, *G. intraradices*, *A. niger* e *Penicillium* sp., têm mostrado a capacidade de solubilizar minerais de K e tornar esses nutrientes disponíveis para as plantas (Lodi *et al.*, 2021; Mirminachi *et al.*, 2002; Soumare *et al.*, 2023). A aplicação de microrganismos solubilizadores de K está ganhando reconhecimento como biofertilizantes essenciais para enfrentar a insegurança alimentar global e para o manejo integrado de nutrientes (INM) (Shrivastava *et al.*, 2016).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

- Isolar e caracterizar bactérias solubilizadoras de potássio de diferentes ambientes e substratos na solubilização de K a partir de rocha potássica do tipo fonolito.

3.2. Objetivos específicos

- Isolar microrganismos solubilizadores de fonolito a partir de solos de diferentes formações florestais;
- Identificar e caracterizar os microrganismos com potencial de solubilização de potássio;
- Avaliar o potencial dos microrganismos selecionados sob condições do solo mediante a inoculação de plantas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a coleta dos microrganismos, foram utilizadas iscas elaboradas a partir de calhas de bambu, preenchidas com arroz cozido, isento de sal e temperos. Essas iscas foram dispostas em seis calhas sob a serrapilheira de eucalipto por um período de sete dias, visando à posterior coleta dos microrganismos. As amostras provenientes de cada calha foram misturadas entre si. Após esse procedimento, foram pesadas 50 g da mistura, que foram então adicionadas a 450 mL de água destilada.

Na formulação dos compostos, optou-se por utilizar bagaço de malte, correspondendo a 40% da mistura, que foi combinado com 60% de farelo de folhas de *Flemingia macrophylla*. Este percentual foi calculado considerando a matéria seca, a qual foi corrigida em estufa de ventilação forçada a 65°C. Os materiais foram posteriormente homogeneizados e inoculados com uma solução inoculante na concentração de 215 µL de inóculos microbianos por kg de substrato, diluída em 10 mL de solução salina.

Para o composto fermentado, após a inoculação, o material foi compactado em um recipiente hermético de vidro com capacidade de 650 dm³, onde permaneceu por um período de 21 dias à temperatura ambiente até o dia da manipulação para a montagem do experimento. Em contrapartida, o composto não fermentado foi preparado e inoculado com a mencionada solução inoculante no momento da fertilização. Estes procedimentos foram detalhados por Goulart (2023).

Quanto à fertilização, para a oferta de fósforo (P), foi utilizado o superfosfato simples, que apresenta 18% de solubilidade. Para o fornecimento de potássio (K), foi empregada uma rocha silicática-potássica (Ekosil) com apenas 1% de solubilidade em ácido cítrico. O produto comercial Ekosil é um fertilizante potássico derivado de rochas silicatadas do tipo fonolito, de origem vulcânica localizada no planalto de Poços de Caldas - MG (Yoorin Fertilizantes, 2024). Este produto é obtido pela moagem da rocha, apresentando características físico-químicas e mineralógicas que incluem: pH de 10,09; 8,0% de K₂O total; 1,0% de K₂O solúvel em ácido cítrico a 2% (1:100); 25,0% de Si total e concentrações de 1,0%, 0,01%, 0,15%, 0,15% e 0,0004% para cálcio, zinco, manganês, magnésio e cobalto totais, respectivamente.

4.1. Experimento 1: Capacidade de solubilização de K *in vitro*

4.1.1. Isolamento de microrganismos

Goulart (2023) observou que a inoculação de microrganismos capturados com iscas de arroz cozido em áreas de eucalipto beneficiou o crescimento do tomateiro na presença de rocha

potássica, indicando a presença com microrganismos potencialmente solubilizadores de potássio nessas áreas. Deste modo, objetivou-se isolar microrganismos solubilizadores a partir da rizosfera do tomateiro inoculado com esses microrganismos.

Adicionalmente, foram isoladas bactérias a partir da rizosfera de plantas saxícolas, que são plantas que crescem em pequenos platôs ou fendas com solos localizados em rochas. A hipótese testada foi a de que microrganismos solubilizadores de rochas estão presente na rizosfera dessas plantas, auxiliando-as na obtenção de nutrientes a partir da rocha matriz. A rizosfera dessas plantas foi coletada um costão rochoso no município de Vila Velha no Espírito Santo a 20°25'34.1"S e 40°19'09.2" W. As plantas foram removidas manualmente as raízes agitadas dentro de tubos de centrífuga estéreis de 50 ml. As amostras foram armazenadas em temperatura de 4°C até isolamento das bactérias.

Para o isolamento de microrganismos da rizosfera do tomateiro, este foi inoculado com microrganismos capturados a partir de um solo sob eucalipto, localizado no campo experimental da Embrapa Agrobiologia, em Seropédica, Rio de Janeiro. As iscas foram instaladas conforme descrito em Goulart (2023) e coletadas após sete dias. Em seguida, foram diluídas e inoculadas no tomateiro, utilizando quatro repetições e vasos com capacidade de 5 kg cada, cultivados em solo adubado com uma fonte potássica de baixa solubilidade (fonolito, nome comercial Ekosil). Após um período de 36 dias, foi realizada uma amostragem composta, na qual foi extraído 1 g de solo, diluído em solução salina a 0,85% (NaCl) e posteriormente submetido a diluições que variaram de 10^{-1} a 10^{-6} . Foram inoculados cem microlitros de cada diluição em meio Aleksandrov (Thangavelu, 2021), em triplicata, e incubados por seis dias, até a observação do surgimento de colônias e formação de halos de solubilização.

No que diz respeito ao isolamento das bactérias provenientes da rizosfera de plantas saxícolas, seguiu-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, sendo que o solo rizosférico foi inoculado diretamente nos meios de cultura Aleksandrov. Os microrganismos que apresentaram resultados positivos para a solubilização de potássio foram purificados e armazenados em tubos com óleo mineral à temperatura ambiente, além de em glicerol a -80 °C. Por fim, de modo a aumentar o número de potenciais solubilizadores, avaliou-se a capacidade de solubilização das estirpes do gênero *Paraburkholderia* pertencentes à coleção de culturas do Centro de Recursos Biológicos Johanna Döbereiner da Embrapa Agrobiologia. Esse gênero foi escolhido por apresentar representantes solubilizadores de K, Rossi *et al.* (2024). As estirpes utilizadas estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1- Estirpes de *Paraburkholderia* spp. utilizadas nos testes de solubilização de K e no experimento de inoculação em planta. As informações apresentadas foram disponibilizadas no sistema *AleloMicro*

Código	Taxonomia	Local da coleta	Hospedeiro	Substrato
BR3486	<i>Paraburkholderia phymatum</i>	Guiana Francesa	<i>Machaerium lunatum</i>	Não identificado
BR3461	<i>Paraburkholderia nodosa</i>	Marliéria, MG	<i>Mimosa bimucronata</i>	Raiz
BR12315	<i>Paraburkholderia caribensis</i>	Martinica	<i>Não Identificado</i>	Solo
BR3470	<i>Paraburkholderia nodosa</i>	Minas Gerais	<i>Mimosa bimucronata</i>	Raiz
BR3578	<i>Paraburkholderia sp.</i>	Campo Grande, MS	<i>Mimosa sp</i> <i>Mimosa</i>	Não identificado
BR3405	<i>Paraburkholderia sabiae</i>	Seropédica, RJ	<i>caesalpiniiifolia</i>	Raiz
BR3487	<i>Paraburkholderia tuberum</i>	África do Sul	<i>Aspalathus carnosa</i>	Não identificado
BR12203	<i>Paraburkholderia unamae</i>	Morelos, Tlayacapan, México	<i>Zea mays</i>	Não identificado
BR3437	<i>Paraburkholderia nodosa</i>	Curitiba, PR	<i>Mimosa scabrella</i>	Não identificado
BR11366	<i>Paraburkholderia tropica</i>	Timbaúba, PE	<i>Saccharum officinarum</i>	Não identificado
BR11271	<i>Paraburkholderia sp.</i>	Rio de Janeiro	<i>Saccharum sp</i>	Não identificado
BR3454	<i>Paraburkholderia mimosarum</i>	Seropédica, RJ	<i>Mimosa scabrella</i>	Não identificado
BR11897	<i>Paraburkholderia kururiensis</i>	Chiba Kururi, Japão	<i>Não identificado</i>	Água
BR3459	<i>Paraburkholderia phenoliruptrix</i>	Seropédica, RJ	<i>Mimosa flocculosa</i>	Não identificado
BR3600	<i>Paraburkholderia sp.</i>	Morro do Chapéu, BA	<i>Mimosa gemmulata</i>	Não identificado

Fonte: AleloMicro Consultas (2021)

4.1.2 Avaliação *in vitro* do potencial de solubilização de potássio das bactérias

Os meios utilizados neste estudo foram preparados com os seguintes componentes: 5 g de glicose, 0,005 g de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,1 g de $FeCl_3$, 2 g de $CaCO_3$, 2 g de $CaPO_4$, 20 g de ágar-agar, ajustando o pH para 7,2, e 3 g de pó de rocha (Ekosil) como fonte de potássio insolúvel por litro, segundo o método de Aleksandrov. Além disso, outra formulação foi preparada com 5 g de glicose, 2 g de Na_2HPO_4 , 0,5 g de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,005 g de $FeCl_3$, 0,1 g de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, ajustando o pH para 6,5, e 15 g de ágar, complementada com 25 mL de azul de bromotimol e 5 g de pó de rocha. Após a preparação dos meios, estes foram esterilizados em autoclave por um período de 30 minutos.

As cepas bacterianas foram previamente cultivadas em meio DYGS modificado, conforme descrito por Rodrigues Neto *et al.* (1986). Após a incubação em temperatura de 30 °C a 200 rpm por 24 horas, 1 mL dos cultivos foi centrifugado a 5000 rpm a 25 °C por 5 minutos. O sobrenadante foi descartado, e o precipitado bacteriano foi ressuspenso em uma solução contendo os sais de cada meio testado, realizando-se duas lavagens sucessivas. Após estas etapas, o conteúdo bacteriano foi novamente suspenso em 1 mL da solução salina, e, em seguida, inoculou-se 10 µL desse suspenso em placas de cultura. As placas foram incubadas a 30 °C em ambiente escuro por 144 horas, conforme descrito por Hu *et al.* (2006) apud Rajitangavelu (2021).

A capacidade de solubilização de potássio foi avaliada com base na formação de halos ao redor das colônias. Os melhores isolados solubilizadores foram testados em meio líquido B&B (Bassak e Biswas, 2010), que contém pó de rocha como fonte de potássio insolúvel na concentração de 3 g/L. Para a liberação quantitativa de potássio, foi inoculado 1 mL de cada isolado bacteriano em frascos Erlenmeyer de 125 mL, contendo 50 mL de caldo B&B. Estes frascos foram incubados a 180 rpm a 30 °C por 15 dias. Posteriormente, as amostras das culturas foram filtradas por meio de um filtro de 0,22 µm para determinar a quantidade de potássio disponível como descrito por (Rossi *et al.* 2024), com algumas alterações quanto ao tempo de cultura que foi de 15 dias.

4.1.3 Caracterização molecular dos microrganismos estudados

A extração do DNA dos isolados bacterianos foi realizada utilizando o kit Wizard Genomic DNA Isolation da Promega, com o intuito de amplificar o gene do RNA ribossômico 16S, utilizando primers universais 27F (5' AGAGTTTGATCCTGGCTCAG 3') e 1492R (5'

GGTTACCTTGTTACGACTT 3’). A identificação molecular das bactérias isoladas foi conduzida por meio da técnica de reação em cadeia da polimerase (PCR), empregando os primers universais 27F e 1492R para todos os isolados bacterianos.

A PCR consistiu em um volume total de 55 μL , composto por 1 μL de DNA, 11 μL de uma mistura de dNTPs, 11 μL de cada primer (forward e reverse), 16,5 μL de tampão (MgCl_2), 2,2 μL de Taq polimerase e 410,3 μL de água deionizada. O processo de PCR foi conduzido da seguinte forma: após uma desnaturação inicial de 2 minutos a 95 °C, foram realizados 30 ciclos, cada um consistindo de desnaturação a 95 °C durante 1 minuto, anelamento a 55 °C por 1 minuto, extensão a 72 °C por 1,5 minutos, seguido de uma extensão final a 72 °C por 5 minutos. A reação de PCR foi efetuada em um termociclador da marca Agilent Technologies.

Os produtos de amplificação gerados pela PCR foram analisados por eletroforese em gel de agarose (0,6 g por 100 mL) utilizando tampão 1X TAE. Um fragmento de DNA, com aproximadamente 1,5 kb, foi eluído utilizando o Wizard SV Gel and PCR Clean-Up System. Os produtos da PCR foram sequenciados, e as sequências obtidas foram comparadas com as sequências bacterianas disponíveis em bancos de dados, como o NCBI, utilizando a plataforma BLASTn (Etesami *et al.*, 2017). Para realizar alinhamentos múltiplos de sequência de DNA, foi empregada a plataforma ARB-SILVA no software MEGA X (Tamura *et al.*, 2013). A construção da árvore filogenética para as sequências nucleotídicas identificadas foi baseada no método de Neighbor Joining (Tamura *et al.*, 2013).

4.1.3 Experimento 2: Solubilização de K em casa de vegetação.

Neste experimento, avaliamos os microrganismos selecionados no primeiro experimento em comparação aos microrganismos da coleção de culturas do Centro de Recursos Biológicos Johanna Döbereiner da Embrapa Agrobiologia. Para tal, esses microrganismos foram inoculados em plantas de milho, visando avaliar seu potencial de solubilização em condições de solo. O delineamento experimental adotado foi em parcelas subdivididas, contando com 4 repetições em um esquema fatorial $2 \times 13 + 2$, sendo: 2 níveis de K solúvel (40 e 400 kg ha^{-1} , considerados baixo e alto, respectivamente), 13 tipos de inoculação, além de 2 tratamentos adicionais, totalizando 28 diferentes tratamentos.

O experimento foi iniciado em 21 de maio de 2024, com o plantio de 50 sementes de milho em tubetes, seguido de um desbaste realizado sete dias após a semeadura, de modo a deixar apenas 10 plantas por tubete. Cada parcela foi composta por 0,22 dm^3 de solo calcipedido de Planosolo, previamente peneirado e seco ao ar, que foi acondicionado nos tubetes. O solo

foi umedecido com água até atingir 70% do volume total de poros, a fim de viabilizar a reação dos produtos aplicados. Foram adicionados ao solo 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 500 kg ha⁻¹ de nitrato de amônio, além de outros nutrientes fornecidos na forma de solução, a fim de suprir as necessidades nutricionais da cultura.

Após um período de 45 dias, as plantas foram coletadas, separando a parte aérea das raízes. As raízes foram lavadas em água corrente utilizando uma peneira, para evitar perdas. Posteriormente, foram secas em uma estufa com circulação de ar, ajustada a 65°C, até que atingissem o peso constante. A parte aérea foi submetida ao mesmo processo de secagem. Assim, foram avaliadas a massa seca da parte aérea, a massa seca das raízes e o teor de K na parte aérea.

4.1.4 Análise estatística

Os dados provenientes de todos os experimentos foram submetidos a análises de normalidade, homogeneidade de variâncias e à análise de variância (ANOVA, $p < 0,05$). Após a identificação de diferenças estatisticamente significativas, procedeu-se à aplicação do teste de Tukey ($p < 0,05$) para a comparação entre as médias.

5 RESULTADOS

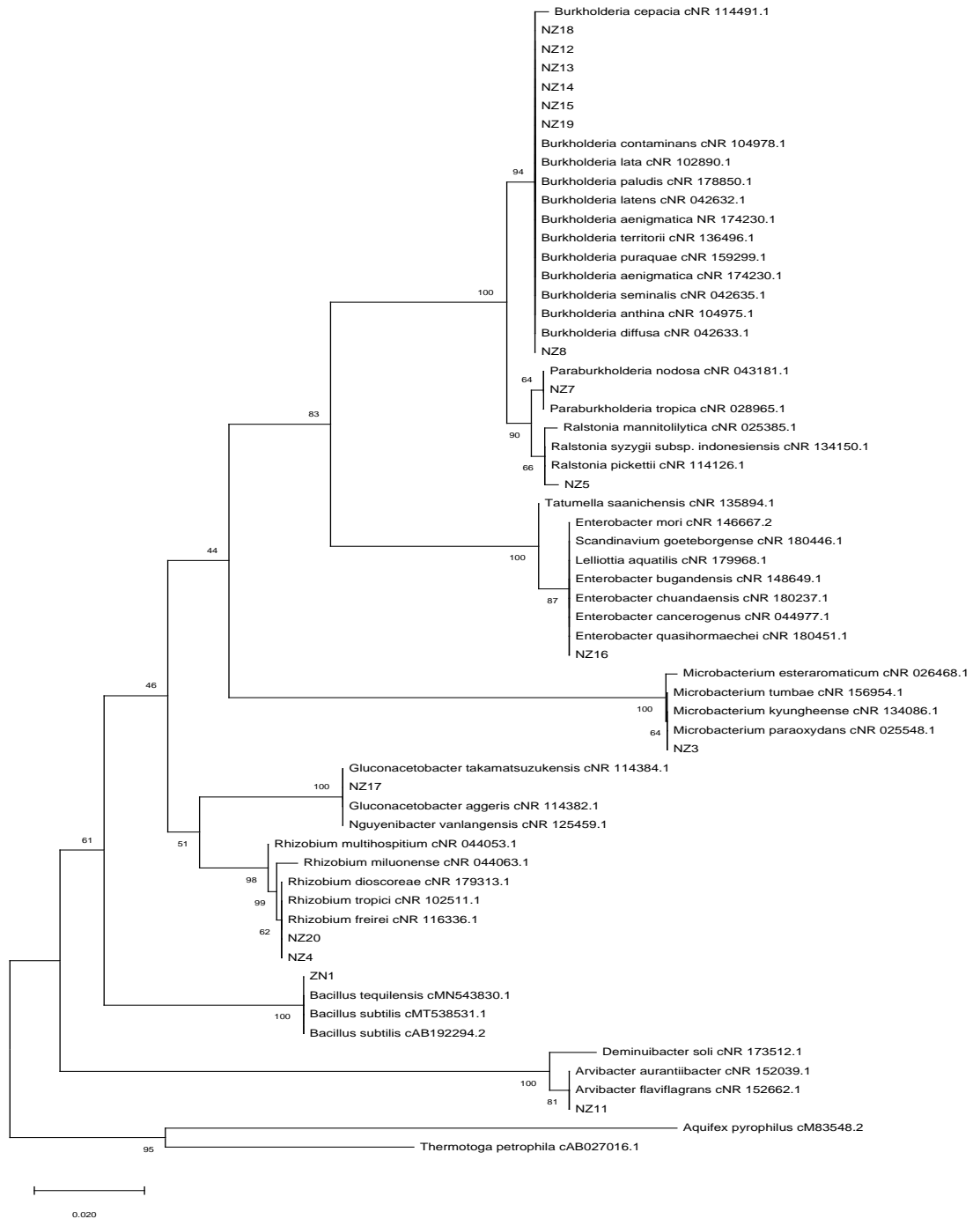
5.1 Isolamento e caracterização morfológica e molecular dos microrganismos

Ao todo, foram obtidos 34 isolados decorrentes do processo de isolamento e triagem das bactérias cultivadas nos meios Aleksandrov e B&B. As características morfológicas apresentadas por essas bactérias no meio DYGS foram bastante diversas, incluindo: forma circular e tamanho médio; coloração variando entre bege, rosa e amarelo; transparência, com algumas colônias sendo translúcidas e outras opacas; elevação podendo ser convexa ou plana; além de apresentar aspectos leitosos, mucoides e viscosos. A maioria das colônias formadas pelos isolados apresentava opacidade, embora algumas fossem translúcidas.

Certos isolados não foram examinados devido à sua similaridade fenotípica, o que resultou em uma diminuição do número de bactérias selecionadas para cultivo simultâneo em meio sólido. Por meio de uma triagem primária no meio DYGS, foram escolhidas colônias com características fenotipicamente distintas. Assim, com base nas características fenotípicas das bactérias e suas semelhanças, o número de isolados foi reduzido a dezessete para o sequenciamento do gene do RNAr 16S. Após a edição do alinhamento das sequências, restaram 429 posições, que foram utilizadas para a geração da filogenia, conforme descrito na seção de Materiais e Métodos.

A análise filogenética do gene revelou que cinco isolados pertencem ao gênero *Burkholderia*, agrupando-se no clado cepacia; dois são do gênero *Rhizobium*; e os demais isolados, um de cada, pertencem aos gêneros *Paraburkholderia*, *Ralstonia*, *Enterobacter*, *Microbacterium*, *Gluconacetobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus* e *Arvibacter* (Figura 1)

Figura 1- Árvore filogenética construída com o gene RNAr 16S de isolados de bactérias solubilizadoras de K isoladas da rizosfera do tomateiro e de plantas saxícolas. A árvore foi construída com o algoritmo neighbor-joining, a distância de Kimura 2 parâmetros e parâmetro gama 0,56. Valores de bootstrap (2.000 replicatas) acima de 50% são apresentados. A barra indica o número de substituição de bases por sítio.

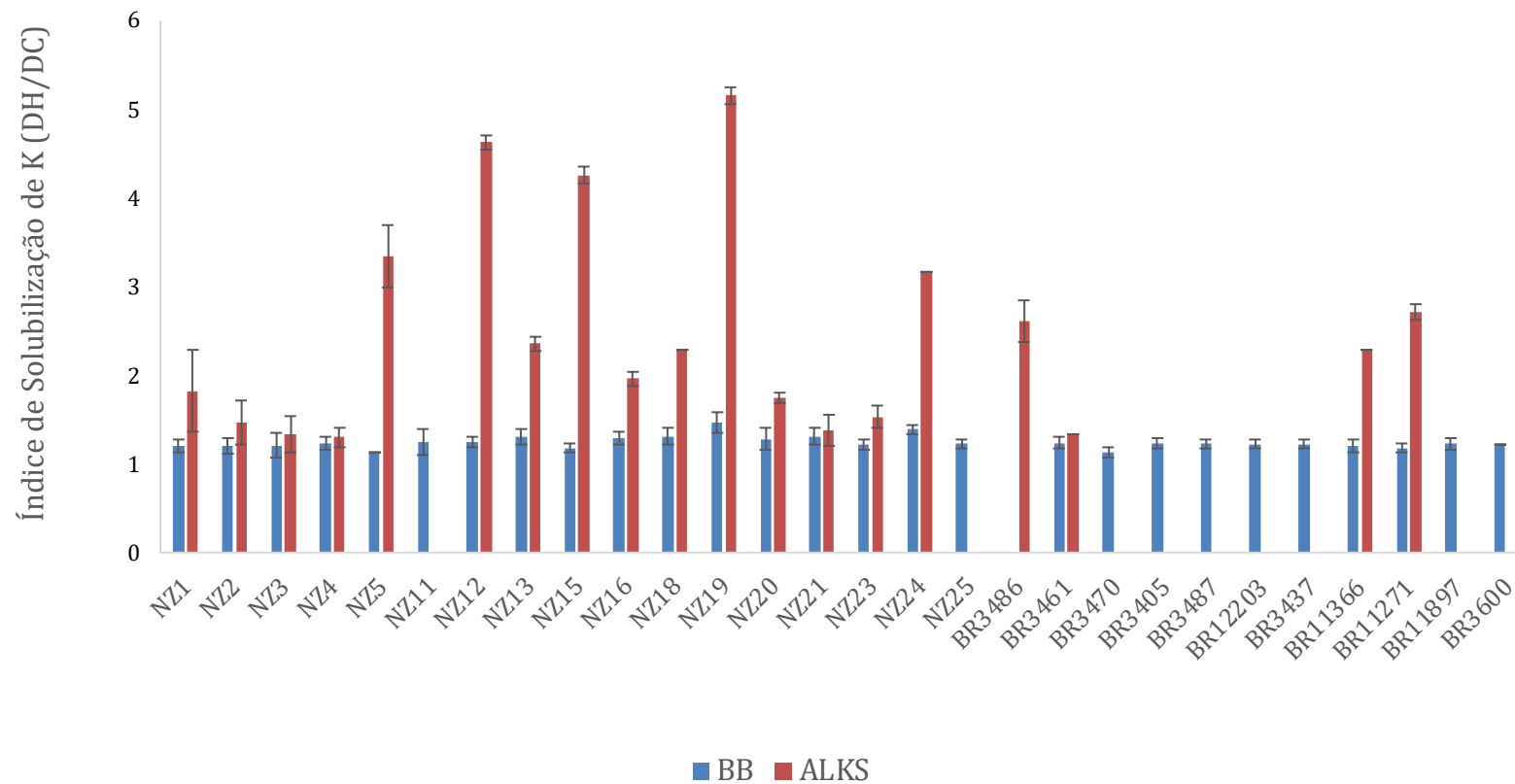


Fonte: Do Autor (2024)

5.2 Solubilização de rocha potássica em meios sólido e líquido

Foi utilizado um meio ágar contendo fonolito para realizar a medição quantitativa da capacidade de solubilização de potássio (K). Um total de vinte e oito isolados bacterianos demonstraram habilidade em solubilizar K no meio B&B, enquanto dezenove isolados o fizeram no meio Aleksandrov. Todos os isolados foram capazes de solubilizar o fonolito, e o índice de solubilização manteve-se relativamente constante quando os isolados foram cultivados no meio B&B (Figura 2). Entretanto, nove isolados não conseguiram solubilizar o potássio da rocha no meio Aleksandrov. Entre os isolados que apresentaram capacidade de solubilização, destacaram-se os classificados como NZ5, NZ12, NZ15 e NZ19, que apresentaram os maiores índices de solubilização, conforme ilustrado na Figura 2.

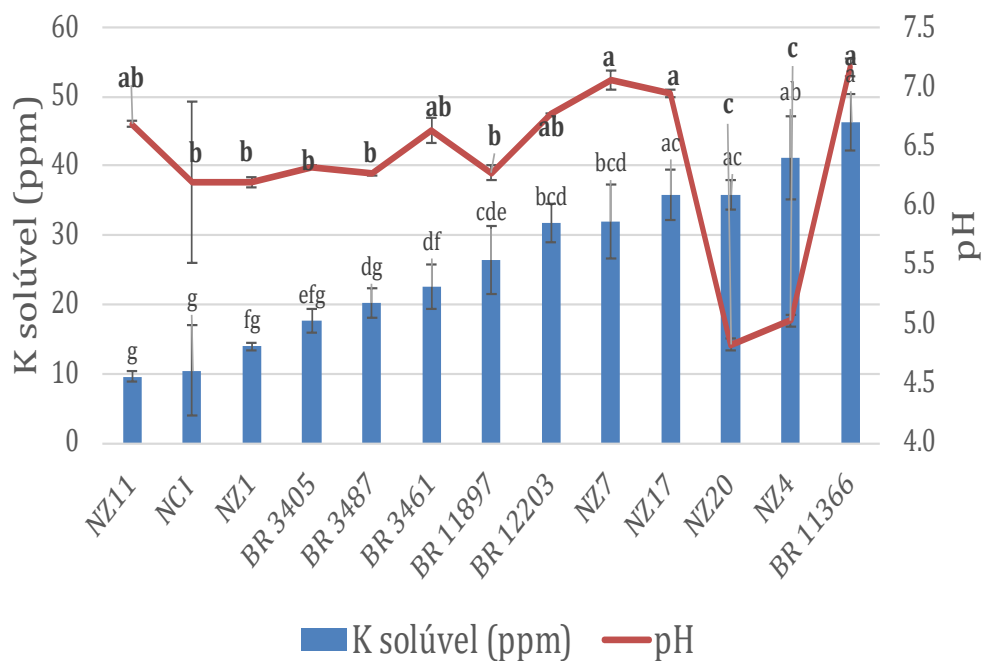
Figura 2-Índice de solubilização de K dos isolados bacterianos das rizosferas do tomateiro e plantas saxícolas (códigos NZ) e do Centro de Recursos Johanna Döbereiner (códigos BR) nos meios sólidos B&B (BB) e Aleksandrov (ALMS) sólidos



Fonte: Do Autor (2024)

Para o ensaio no meio líquido, o fonolito foi adicionado ao meio B&B líquido como única fonte de K. A quantidade de K liberada no período de incubação de 15 dias variou entre 20,2 e 41,1 ppm (Figura 3). Os resultados demonstraram que as concentrações de K liberadas no período de 15 dias foram maiores do que as do controle, exceto em um isolado que apresentou valores menores. Dos isolados, oito proporcionaram um teor de K solúvel significativamente maior no meio de cultura em relação ao controle não inoculado. Dentre eles, destacou-se a estirpe BR 11366 de *Paraburkholderia*, seguida por duas espécies de *Rhizobium*, *R. tropici* e *R. dioscoreae*, isoladas da rizosfera do tomate e de plantas saxícolas. A estirpe BR 11366 aumentou o pH do meio de cultivo para 7,16, enquanto esta variável decresceu acentuadamente no meio contendo as estirpes de *R. dioscoreae* (pH 4,83) e *R. tropici* (pH 5,03). A estirpe NZ17 de *Gluconacetobacter* aumentou o pH para 7,06, enquanto as demais estirpes mantiveram o pH entre 6,20 e 6,77.

Figura 3- Potássio solubilizado (ppm) e variação do pH em meio B&B líquido (pH 6,5) inoculado por 15 dias com os treze isolados com o melhor índice de solubilização.



Fonte: Do Autor (2024)

5.3 Inoculação do milho com bactérias solubilizadoras de K sob doses baixa e alta de K na forma de fonolito

As plantas de milho foram inoculadas com seis estirpes isoladas neste estudo, juntamente com seis estirpes de *Paraburkholderia* spp., provenientes do Centro de Recursos

Biológicos Johanna Döbereiner. A seleção dessas estirpes foi baseada em critérios taxonômicos, visando a exclusão de potenciais organismos oportunistas, além da avaliação dos resultados de solubilização em meio sólido.

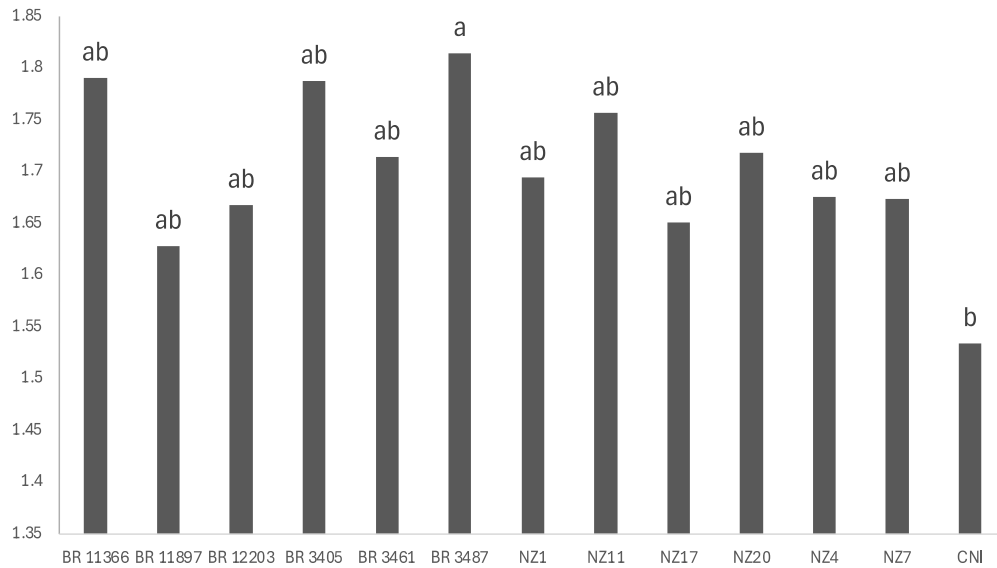
Os efeitos da inoculação demonstraram-se significativos para o aumento da massa seca tanto da parte aérea quanto das raízes, com níveis de significância de 7% e 1%, respectivamente (Quadro 1). Ao considerar exclusivamente o fator inoculação, a estirpe BR 3487 de *Paraburkholderia tuberum* destacou-se como a mais eficaz na promoção do acúmulo de massa seca na parte aérea do milho, apresentando diferença estatisticamente significativa em relação ao tratamento não inoculado (Figura 4). Outras estirpes analisadas não apresentaram respostas diferenciadas em relação à BR 3487 e ao controle. No que se refere ao acúmulo de massa seca nas raízes, a inoculação com a estirpe BR 11897 de *Paraburkholderia kururiensis* resultou no melhor desempenho, diferenciando-se dos tratamentos inoculados com as estirpes NZ4, NZ11 e NZ17 (Figura 5).

Tabela 2- Resumo da análise de variância das variáveis massa seca da parte aérea e massa seca das raízes de plantas de milho inoculadas com bactérias solubilizadoras de potássio sob baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Parte aérea		Raízes	
		Soma de quadrado	Valor P	Soma de quadrado	Valor P
Dose de K	1	2,84	0,19	0,13	0,75
Inoculação	12	1,79	0,07	2,94	0,01
Blocos	3	0,06	0,98	5,98	0,09
Dose de K x					
Inoculação	12	0,90	0,55	0,91	0,54
CV% Dose de K			21,76		9,52
CV% Inoculação			9,51		9,12

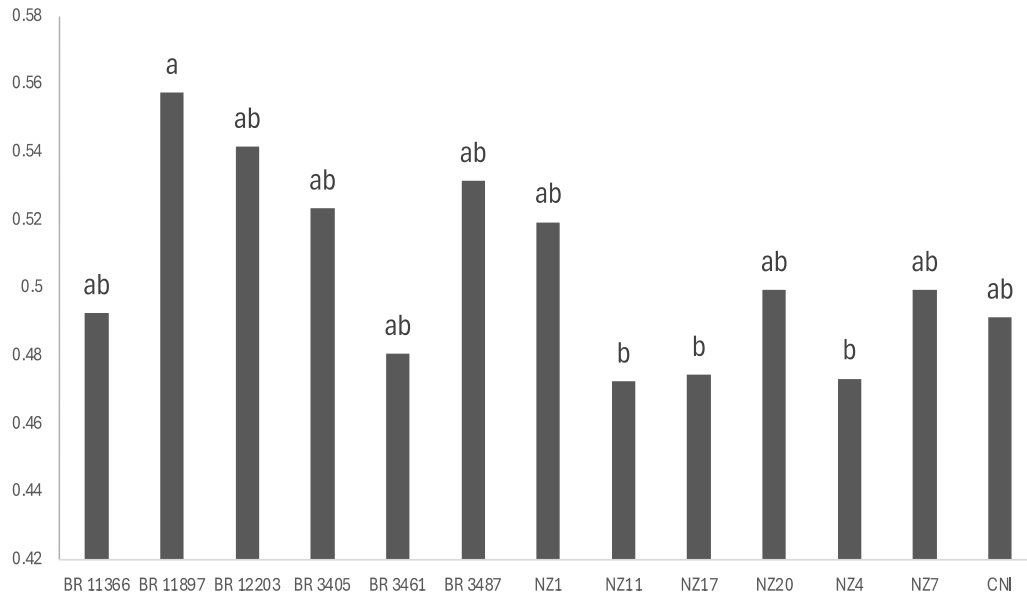
Fonte: Do Autor (2024)

Figura 4 - Massa seca da parte aérea de plantas de milho inoculadas com solubilizadoras de K em condições de baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados apresentados são independentes da dose, ou seja, as médias representam a média das repetições de todos os tratamentos inoculados com um dado isolado bacteriano, independentemente de estar ou não em baixa ou alta dose de K. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. CNI: controle não inoculado.



Fonte: Do Autor 2024

Figura 5- Massa seca das raízes de plantas de milho inoculadas com bactérias solubilizadoras de K em condições de baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados apresentados são independentes da dose, ou seja, as médias representam a média das repetições de todos os tratamentos inoculados com um dado isolado bacteriano, independentemente de estar ou não em baixa ou alta dose de K. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. CNI: controle não inoculado.

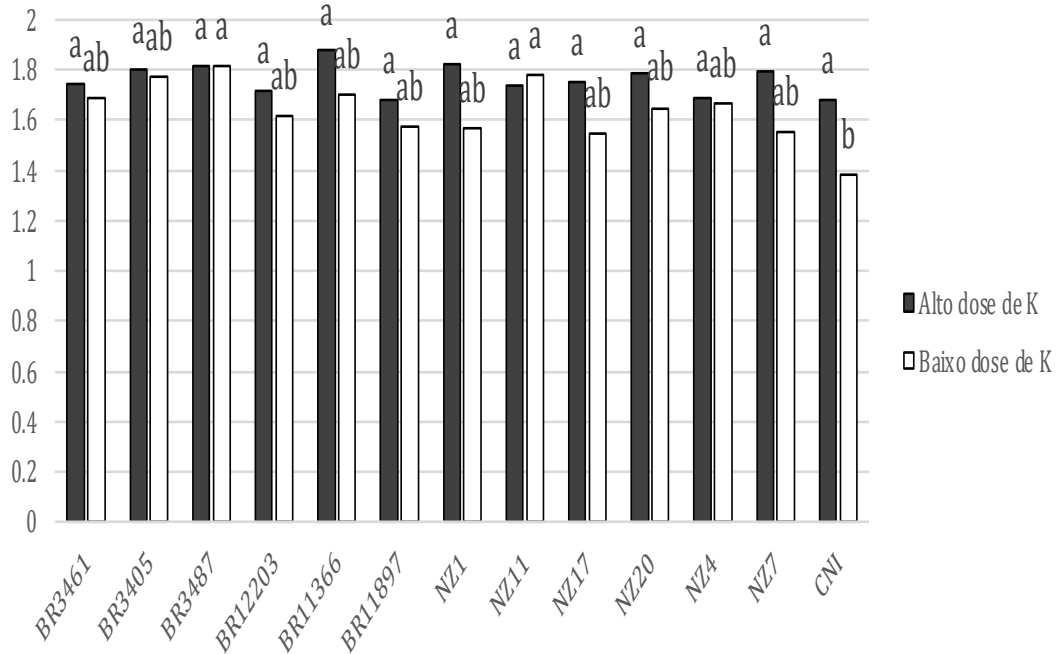


Fonte: Do Autor (2024)

Ao considerar as variações nos níveis de doses de potássio (K), a inoculação do milho com as estirpes BR 3487 de *P. tuberum* e NZ11 de *Arvibacter aurantiibacter* resultou em um acúmulo de massa seca da parte aérea significativamente superior em comparação ao controle não inoculado ($p < 0,07$) (Figura 6). As demais estirpes apresentaram resultados ambíguos, não demonstrando diferenças significativas em relação ao controle nem às estirpes mais eficazes, o que torna os dados sobre o seu efeito inconclusivos.

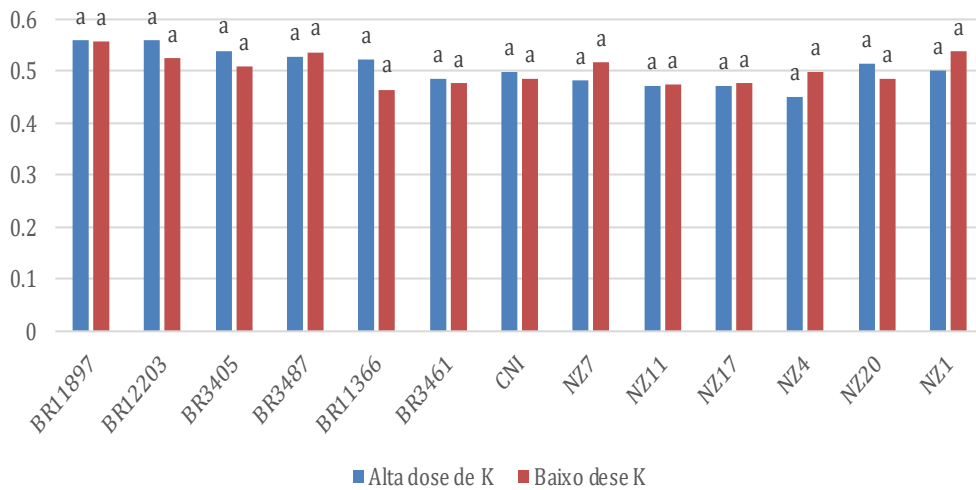
Ao comparar a massa seca da parte aérea sob condições de alta e baixa disponibilidade de K para a mesma estirpe, observou-se que os resultados obtidos na menor dose de inoculação foram equivalentes aos da maior dose. Em contrapartida, as plantas do controle não inoculado mostraram um desempenho inferior na menor dose. Esses achados indicam que a inoculação contribuiu para compensar a menor fertilidade em K. Adicionalmente, não foram observadas diferenças significativas na massa seca da parte aérea na maior dose de K. Por fim, a inoculação não exibiu efeito significativo sobre a massa seca das raízes (Figura 7).

Figura 6- Massa seca da parte aérea de plantas de milho inoculadas com bactérias solubilizadoras de K em condições de baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados são apresentados por dose. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.



Fonte: Do Autor (2024)

Figura 7- baixa e alta dose de K (40 e 400 kg ha⁻¹). Os resultados são apresentados por dose. Letras diferentes indicam significância pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.



Fonte: Do Autor (2024)

6. DISCUSSÃO

O processo de isolamento e caracterização de bactérias solubilizadoras de potássio (BSK) foi conduzido em três etapas distintas. Inicialmente, foi realizada a seleção primária em meio sólido, utilizando o meio de cultura Aleksandrov, conforme estabelecido por Aleksandrov *et al.* (1967) e modificado na formulação proposta por Hu, Chu e Guo (2006). As seleções secundária e terciária ocorreram em meio B&B, conforme descrito por Basak e Biswas (2010), e modificado por Rossi *et al.* (2024). Tradicionalmente, a identificação primária de BSK ocorre em meio Aleksandrov, baseando-se na formação de um halo translúcido ao redor da colônia bacteriana, o que indica a solubilização do mineral potássico. Metodologias semelhantes são empregadas na solubilização de outros nutrientes, como fósforo e zinco (Nautiyal, 1999; Ribeiro *et al.*, 2020). A confirmação da solubilização em meio B&B foi realizada devido ao risco potencial de seleção de falsos positivos em meios contendo outras fontes de nutrientes, como CaCO_3 e Ca_3PO_4 , que, ao serem solubilizados, também geram halos (Rossi *et al.*, 2024).

Após a primeira seleção, foram obtidos 34 isolados com características macromorfológicas distintas. Após esta segunda seleção, apenas 12 dos 34 isolados demonstraram a formação de halos proeminentes, corroborando a presença de falsos positivos no meio de cultura Aleksandrov, que é comumente utilizado para este propósito. Dos 12 isolados avaliados, oito promoveram aumentos significativos no teor de potássio solúvel em meio líquido, com incrementos entre 116% e 341% em relação ao controle não inoculado. A estirpe com maior capacidade de solubilização de K em meio líquido foi identificada como BR 11366 (*Paraburkholderia tropica* Ppe8T), com uma concentração de 46,33 mg L⁻¹ de K solúvel. Esta estirpe, proveniente do CRB-JD, integra um consórcio bacteriano utilizado como inoculante em cana-de-açúcar (Oliveira *et al.*, 2006; Reis *et al.*, 2009) e já foi descrita anteriormente como uma eficiente solubilizadora de outras rochas potássicas (Rossi *et al.*, 2024).

Embora índices de solubilização possam ser calculados com base nos diâmetros do halo e da colônia, a etapa subsequente geralmente envolve a avaliação em meio líquido, proporcionando uma análise quantitativa do potencial de cada isolado. Exemplos de estudos que seguiram este protocolo para isolamento e caracterização de bactérias solubilizadoras de K incluem Sarikhani *et al.* (2018) e Meena *et al.* (2015). Zhang e Kong (2014) e Bakhshandeh *et al.* (2017) investigaram 12 estirpes de bactérias isoladas da rizosfera de kharif, constatando que estas possuíam capacidade de solubilização de resíduos de mica, moscovita e biotita tanto em meio sólido quanto em meio líquido.

A solubilização de K por estirpes como NZ4, NZ20 e NZ17 (*Nguyenibacter* sp.), isoladas da rizosfera do tomateiro e de plantas saxícolas apresentou resultados semelhantes aos da BR 11366. O cultivo dessas estirpes resultou em disponibilizações de 41,14, 35,83 e 35,78 ppm de K, representando aumentos de 292%, 241% e 241% em relação ao controle não inoculado, bem como 89%; 77% e 77% em comparação com BR 11366. Ambas as estirpes BR 11366 e NZ17 (*Nguyenibacter* sp.) demonstraram um leve aumento do pH do meio de cultura, elevando-se de 6,5 para 7,16 e 6,95, respectivamente. Em contraste, as estirpes de *Rhizobium tropici* e *R. dioscoreae* resultaram em uma diminuição do pH para 5,03 e 4,83, respectivamente. A redução do pH observada nas BSKs do gênero *Rhizobium* foi previamente relatada por Meena *et al.* (2015), bem como em BSKs de outros gêneros (Meena *et al.*, 2015; Anjanadevi *et al.*, 2016; Qureshi *et al.*, 2017).

A acidificação do meio inoculado com *Rhizobium* pode ser atribuída à produção de ácidos orgânicos e inorgânicos (Etesami *et al.*, 2017), enquanto a leve alcalinização sugere a ação de outros fatores. Raji e Thangavelu (2021) relataram que as bactérias solubilizadoras de K e P produzem diferentes ácidos orgânicos, como ácidos acético, cítrico, fumárico, glucônico, oxálico e tartárico, os quais resultam na diminuição do pH do meio. Por sua vez, o aumento do pH pode ser associado à produção de amônia e outros metabólitos decorrentes da morte e proteólise das células microbianas durante períodos prolongados de incubação. Resultados semelhantes foram observados por Buragohain *et al.* (2018) após 40 dias de incubação do solubilizador de K, atribuindo-se o aumento do pH à presença e dissolução de impurezas como CaCO_3 e MgCO_3 em minerais de mica. Estes achados são relevantes, uma vez que a acidólise é geralmente considerada o principal mecanismo de solubilização de K (Etesami *et al.*, 2017). O resultado oposto para a maioria das estirpes indica que um mecanismo alternativo pode estar em ação. Outra possibilidade é que a acidificação e disponibilização do K tenha ocorrido nos primeiros dias de crescimento microbiano visto que algumas estirpes de *Paraburkholderia* spp. podem ter diferentes reações de pH em meio de cultivo ao longo do período de crescimento. Isso poderá ser avaliado em estudos futuros, fazendo o monitoramento do pH ao longo do período de incubação.

Estudos anteriores sugerem que a eficiência das bactérias solubilizadoras de K se manifesta não apenas *in vitro*, mas também quando inoculadas em plantas (Liu *et al.*, 2006; Meena *et al.*, 2015). No que diz respeito ao experimento de inoculação do milho com os isolados e estirpes selecionados, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas no acúmulo de massa seca da parte aérea entre os tratamentos expostos a uma alta

dose de potássio (400 kg ha^{-1}) ($p < 0,05$). No entanto, diferenças significativas foram observadas com a aplicação de uma baixa dose de potássio (40 kg ha^{-1}) ($p < 0,07$), embora não tenha sido registrada resposta na massa seca das raízes. Os principais destaques, desconsiderando as diferenças nas doses de K, foram a estirpe BR 3487 de *P. tuberum* para a parte aérea e a estirpe BR 11897 de *P. kururiensis* para as raízes. Ao analisar as respostas dentro do nível da menor dose de K (40 kg ha^{-1}), as melhores respostas foram observadas com a inoculação de um isolado da rizosfera do tomateiro, identificado como *Arvibacter aurantiibacter* (NZ11), e a estirpe BR 3487 de *Paraburkholderia tuberum*, isolada de nódulos da leguminosa *Aspalathus carnosus*, na África do Sul (Elliot *et al.*, 2007). As inoculações de *A. aurantiibacter* (NZ11) e *P. tuberum* BR 3487 resultaram em aumentos de biomassa de 28,4% e 31%, respectivamente. Apesar de ambas as estirpes terem promovido o aumento da biomassa na parte aérea, não se mostraram eficientes na solubilização de K conforme os testes em meios de cultura previamente discutidos. Esses resultados, em conjunto, sugerem que a promoção do crescimento pode ter sido decorrente de um mecanismo distinto da solubilização de K, como a melhoria na eficiência do uso de K.

7. CONCLUSÕES

A aplicação de microrganismos representa uma abordagem promissora para aumentar a disponibilidade de potássio para as plantas, especialmente em condições de baixa disponibilidade de nutrientes e na presença de rochas de baixa solubilidade, como o fonolito. Embora diversas estirpes tenham demonstrado capacidade de disponibilizar K solúvel a partir do fonolito em meios sólido e líquido, as estirpes com maior eficiência na solubilização não foram as mesmas que resultaram em um maior acúmulo de massa seca na parte aérea do milho. Isso sugere que o efeito promotor sobre o crescimento vegetal pode ser atribuído a mecanismos distintos da simples solubilização de K. As estirpes que se destacaram na solubilização em meio líquido foram a BR 11366 de *Paraburkholderia tropica*, além de duas estirpes do gênero *Rhizobium*. Por outro lado, os isolados que melhor favoreceram o crescimento das plantas sob baixa dose de K (40 kg ha^{-1}) foram uma estirpe de *Arvibacter* sp. (NZ11) e uma estirpe de *Paraburkholderia tuberum* (BR 3487).

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. *et al.* Potassium-Solubilizing Bacteria and Their Application in Agriculture. **Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture**, p. 293–313, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-2776-2_21>. Acesso em: 8 maio 2023.
- ALELOMICRO CONSULTAS, 2021; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa); Disponível em <https://am.cenargen.embrapa.br/amconsulta>; Acesso em 23/07/2024.
- ALVES, V. M. C. *et al.* Solubilização de potássio presente em minerais por microrganismos e efeitos no desenvolvimento de culturas agrícolas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 20 p. Disponível em:<<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=1134272&biblioteca=vazio&busca=1134272&qFacets=1134272&sort=&pagina=1>>. Acesso em: 5 maio 2023.
- ANJANADEVI, I. P.; JOHN, N. S.; John, K. S.; Jeeva, M. L.; Misra, R. S. Pedra Habitando bactérias solubilizadoras de potássio de Kerala, Índia: caracterização e possibilidade de substituição química de fertilizantes **K. J Basic Microbiol**, v. 56, n. 1, p. 67–77, 2016.
- AR BHOSALE *et al.* Effect of graded levels of nitrogen and potassium on yield and nutrient content of watermelon in lateritic soils of Konkan. **International Journal of Chemical Studies**, v. 5, n. 2, p. 467–470, 2017. Disponível em: <<https://www.chemijournal.com/archives/?year=2017&vol=5&issue=2&ArticleId=476&si=first>>. Acesso em: 10 maio 2023.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2019.
- BAGYALAKSHMI, B.; PONMURUGAN, P.; BALAMURUGAN, A. Potassium solubilization, plant growth promoting substances by potassium solubilizing bacteria (KSB) from southern Indian Tea plantation soil. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 12, p. 116–124, out. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1878818117303572>>. Acesso em: 7 maio 2023.
- BASAK, B. B.; BISWAS, D. R. Co-inoculation of potassium solubilizing and nitrogen fixing bacteria on solubilization of waste mica and their effect on growth promotion and nutrient acquisition by a forage crop. **Biology and Fertility of Soils**, v. 46, n. 6, p. 641–648, 7 abr. 2010. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-010-0456-x>>. Acesso em: 10 maio 2023.
- BILAL, S. *et al.* Comparative Effect of Inoculation of Phosphorus-Solubilizing Bacteria and Phosphorus as Sustainable Fertilizer on Yield and Quality of Mung Bean (*Vigna radiata* L.). **Plants** **2021**, *10*, 2079. <https://doi.org/10.3390/plants10102079>.
- BOUIZGARNE, B. *et al.* Phosphate and potash solubilizing bacteria from Moroccan phosphate mine showing antagonism to bacterial canker agent and inducing effective tomato

growth promotion. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 8 mar. 2023. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36968412/>>. Acesso em: 4 maio 2023.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Tecnologia Mineral. Agrominerais para o Brasil. Editores José Farias de Oliveira; Francisco Rego Chaves Fernandes; Zuleica C. Castilhos. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, 2010. 297 p.,

CAKMAK, I. Potassium for better crop production and quality. **Plant and Soil**, v. 335, n. 1-2, p. 1–2, 27 ago. 2010. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-010-0534-8>>. Acesso em: 10 maio 2023.

CONTINI, E.; ARAGÃO, A. O agro brasileiro alimenta 800 milhões de pessoas. Disponível em: <https://www.beefpoint.com.br/o-agro-brasileiro-alimenta-800-milhoes-de-pessoas/>. Acesso em: 15 mar. 2023.

DAS, D. *et al.* Ongoing soil potassium depletion under intensive cropping in India and probable mitigation strategies. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 1, 13 jan. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-021-00728-6>>. Acesso em: 5 maio 2023.

DHILLON, J. S. *et al.* World Potassium Use Efficiency in Cereal Crops. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 2, p. 889–896, mar. 2019. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2018.07.0462>>. Acesso em: 8 maio 2023.

EL-EGAMI, H. M. *et al.* Impact of Potassium-Solubilizing Microorganisms with Potassium Sources on the Growth, Physiology, and Productivity of Wheat Crop under Salt-Affected Soil Conditions. **Agronomy** **2024**, *14*, 423. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030423>. Acesso em:

ELLIOTT, G. N. *et al.* Nodulation of *Cyclopia* spp. (Leguminosae, Papilionoideae) by *Burkholderia tuberum*. *Ann Bot.* 2007 Dec;100(7):1403-11. doi: 10.1093/aob/mcm227. Epub 2007 Sep 19. PMID: 17881339; PMCID: PMC2759218.

ETESAMI, H.; EMAMI, S.; ALIKHANI, H. A. Potassium solubilizing bacteria (KSB):: Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects A review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 4, p. 897–911, dez. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162017000400005&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 8 maio 2023.

FASUSI, O. A.; CRUZ, C.; BABALOLA, O. O. Agricultural Sustainability: Microbial Biofertilizers in Rhizosphere Management. **Agriculture**, v. 11, n. 2, p. 163, 17 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2077-0472/11/2/163>>. Acesso em: 5 maio 2023.

FATHARANI, R.; RAHAYU, Y. S. Isolation and Characterization of Potassium-Solubilizing Bacteria from Paddy Rhizosphere (*Oryza sativa* L.). **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1108, p. 012105, nov. 2018. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1108/1/012105>>. Acesso em: 5 maio 2023.

FLORENTINO, L. A. *et al.* Potassium solubilization in phonolite rock by diazotrophic bacteria. **Comunicata Scientiae**, v. 8, n. 1, p. 17, 6 abr. 2017. Disponível em: <<https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/1292>>. Acesso em: 5 maio

2023.

GLOBALFERT. Importação de fertilizantes bate recorde em 2020. Análises. Disponível em: www.globalfert.com.br/analises/importacao-de-fertilizantes-bate-recorde-em-2020/. Acesso em: 9 mar. 2023.

GOUDA, S. *et al.* Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. **Microbiological Research**, v. 206, p. 131–140, jan. 2018. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29146250/>>. Acesso em: 5 maio 2023.

GOULART, J. M. **Compostos fermentados farelados: comunidades microbianas e eficiência agrônômica associadas à fertilização no cultivo orgânico de hortaliças**. Tese (Doutorado) - Fitotecnia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023.

GRADELLA, A. dos S. S. **Potássio natural em pré-plantio e fontes de potássio em cobertura no crescimento de plantas, produção e qualidade de frutos de melão cantaloupe**. 28 f. Dissertação (Mestrado) - Agronomia - Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, 2020.

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. **Agronomy**, v. 8, n. 3, p. 31, 12 mar. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4395/8/3/31>>. Acesso em: 5 maio 2023.

HUSSAIN, S.; ALI, H.; GARDEZI, S. T. R. Soil applied potassium improves productivity and fiber quality of cotton cultivars grown on potassium deficient soils. **PLOS ONE**, v. 16, n. 4, p. e0250713, 29 abr. 2021. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0250713>>. Acesso em: 10 maio 2023.

JIANG, G. *et al.* **Exploring rhizo-microbiome transplants as a tool for protective plant-microbiome manipulation**, 2022. ISME Communications; <https://doi.org/10.1038/s43705-022-00094-8>.

JINI, D. *et al.* **Sustainable agricultural practices using potassium-solubilizing microorganisms (KSMs) in coastal regions: a critical review on the challenges and opportunities**. *Environment, Development and Sustainability*, 8 abr. 2023.

KAFKAFI, U.; XU, G.; IMAS, P.; MAGEN, H.; TARCHITZKY, J. Potassium and Chloride in Crops and Soils: The Role of Potassium Chloride Fertilizer in Crop Nutrition; **IPI Research Topics** No. 22; International Potash Institute: Horgen, Switzerland, 2001; p. 220.

KOUR, D. *et al.* Potassium solubilizing and mobilizing microbes: Biodiversity, mechanisms of solubilization, and biotechnological implication for alleviations of abiotic stress. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, p. 177–202, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128205266000129>>. Acesso em: 4 maio 2023.

LODI, L. A. *et al.* A green K-fertilizer using mechanical activation to improve the solubilization of a low-reactivity potassium mineral by *Aspergillus niger*. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, p. 100711, set. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21000888>>. Acesso em: 5 maio 2023.

LOPES-ASSAD, M. L. *et al.* The solubilization of potassium-bearing rock powder by *Aspergillus niger* in small-scale batch fermentations. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 56, n. 7, p. 598–605, jul. 2010. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20651859/>>. Acesso em: 5 maio 2023.

MAÇIK, M.; GRYTA, A.; FRAÇ, M. Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. **Advances in Agronomy**, p. 31–87, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211320300274>>. Acesso em: 8 maio 2023.

MAHMUD, A. A. *et al.* Biofertilizers: A Nexus between soil fertility and crop productivity under abiotic stress. *Current Research in Environmental Sustainability*, v. 3, p. 100063, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666049021000396>>. Acesso em: 5 maio 2023.

MEENA, V. S. *et al.* Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): Isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica. **Ecological Engineering**, v. 81, p. 340–347, ago. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857415001755?casa_token=pgJhD47gFUoAAAAA:pO8yJaFe6cGwKwsnkaAWgFEoy_fVCNUoFI9sA-MC2l5QQNZ8AxNOplOh_I2CtDyxGM6pu5XyPVt>. Acesso em: 10 maio 2023.

MEENA, V. S. *et al.* Potassium-Solubilizing Microorganism in Evergreen Agriculture: An Overview. *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture*, p. 1–20, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-2776-2_1>. Acesso em: 8 maio 2023.

MULUGETA, D. *et al.* Potassium critical level in soil for Teff (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter) grown in the central highland soils of Ethiopia. *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 9, 1 ago. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-0873-x>>. Acesso em: 4 maio 2023.

NAUTIYAL, C. S. *et al.* An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. **FEMS Microbiol Lett.** 1999 Jan 1;170 (1):265-70. doi: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x. PMID: 9919677.

OLANIYAN, F. T. *et al.* The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. **Annals of Microbiology**, v. 72, n. 1, 30 nov. 2022. Disponível em: <<https://annalsmicrobiology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13213-022-01701-8>>. Acesso em: 5 maio 2023.

PÁDUA, S. D. DE; FLORENTINO, L. A. Uso do fonolito e bactérias solubilizadoras de potássio na cultura do feijoeiro. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e53711226248, 5 fev. 2022. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/26248>>. Acesso em: 5 maio 2023.

PANTIGOSO, H. A.; MANTER, D. K.; VIVANCO, J. M. Phosphorus addition shifts the microbial community in the rhizosphere of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Rhizosphere*, v. 7, p. 1–7, set. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452219818300624>>. Acesso em: 5 maio 2023.

PIAN, L.B. 2019. **Influência da Fertilização de Origem Vegetal em Atributos Biológicos e Químicos do Solo e no Desempenho Agroeconômico de Hortaliças em Sistemas Orgânicos**. Tese de Doutorado. 193f. (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

RAJI, M.; THANGAVELU, M. **Isolation and screening of potassium solubilizing bacteria from saxicolous habitat and their impact on tomato growth in different soil types**. *Archives of Microbiology*, v. 203, n. 6, p. 3147–3161, 5 abr. 2021. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33818654/>>. Acesso em: 4 maio 2023.

REIS *et al.* **Eficiência agrônômica do inoculante de cana-de-açúcar aplicado em três ensaios conduzidos no Estado do Rio de Janeiro durante o primeiro ano de cultivo**. *Bolentim de Pesquisa & Desenvolvimento*, 45. 2009.22p (Embrapa Agrobiologia). <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/663945>.

RIBEIRO, N. V. D. S., VIDAL, M. S., BARRIOS, S. C. L. *et al.* Genetic diversity and growth promoting characteristics of diazotrophic bacteria isolated from 20 genotypes of *Brachiaria* spp. **Plant Soil** **451**, 187–205 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04263-y>

SAHA, M. *et al.* Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 7, p. 202–209, jul. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1878818116301694>>. Acesso em: 5 maio 2023.

SATTAR, A. *et al.* Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review. **Applied Soil Ecology**, v. 133, p. 146–159, jan. 2019. Disponível em: <<https://squ.pure.elsevier.com/en/publications/perspectives-of-potassium-solubilizing-microbes-in-sustainable-fo>>. Acesso em: 5 maio 2023.

SHANG, L. *et al.* Isolation and identification of a *Bacillus megaterium* strain with ochratoxin A removal ability and antifungal activity. **Food Control**, v. 106, p. 106743, dez. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095671351930324X>>. Acesso em: 5 maio 2023.

SHARMA, A.; CHETANI, R. Uma revisão sobre o efeito de fertilizantes orgânicos e químicos nas plantas. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, 5, 677–680, 2017.

SHIRALE, A. O. *et al.* Prospects and challenges in utilization of indigenous rocks and minerals as source of potassium in farming. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 19, p. 2682–2701, 5 set. 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/01904167.2019.1659353?needAccess=true&role=button>>. Acesso em: 7 maio 2023.

SIQUEIRA, A.P.P. & SIQUEIRA, M.F.B. **Bokashi: adubo orgânico fermentado**. Niterói: Programa Rio Rural, 2013. 16p. (Programa Rio Rural Manual Técnico, 40).

SOUMARE, A.; SARR, D.; DIÉDHIYOU, A. G. Potassium sources, microorganisms and plant nutrition: Challenges and future research directions. *Pedosphere*, v. 33, n. 1, p. 105–115, fev. 2023.

SUN, F. *et al.* **Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from *Mikania micrantha* rhizospheric soil and their effect on *M. micrantha* plants.** *Global Ecology and Conservation*, v. 23, p. e01141, set. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235198942030682X>>. Acesso em: 5 maio 2023.

TAMURA, K.; STECHER, G.; PETERSON, D.; FILIPSKI, A.; KUMAR, S. 2013. MEGA6: molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*, 30, 2725–2729.

WANG, R. R. *et al.* Isolation and the interaction between a mineral-weathering *Rhizobium tropici* Q34 and silicate minerals. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 31, n. 5, p. 747–753, 26 fev. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-015-1827-0>>. Acesso em: 7 maio 2023.

WARNAKULASOOIYA, D. *et al.* **Biofilm biofertilizer modulates heavy metals in soil–plant systems to produce high-quality rice.** *Academia Environmental Sciences and Sustainability* 2025;2. <https://doi.org/10.20935/AcadEnvSci7532>.

WU S. C., *et al.* **Efeitos de biofertilizante contendo fixador de N, solubilizantes P e K e fungos AM no crescimento do milho: uma trilha em estufa.** *Geoderma* 125: 155–166. 2005.

YADAV, B. K.; SIDHU, A. S. Dynamics of Potassium and Their Bioavailability for Plant Nutrition. *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture*, p. 187–201, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-2776-2_14>. Acesso em: 8 maio 2023.

YOORIN FERTILIZANTES. **Ekosil: potássio para agricultura sustentável, 2024.** Disponível em: <<https://www.yoorin.com.br/pt/produtos/ekosil>>, Acesso em: 22 de jul. de 2024.

ZELELEW, D. Z. *et al.* Effect of Potassium Levels on Growth and Productivity of Potato Varieties. *American Journal of Plant Sciences*, v. 07, n. 12, p. 1629–1638, 2016.