

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 03/09/2024

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until September 3, 2024

HARIANE LUIZ SANTOS

SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDA A *Bacillus velezensis* UFV 3918 E DIFERENTES DOSES DE FOSFATO MONOAMÔNICO

Botucatu

2023

HARIANE LUIZ SANTOS

SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDA A *Bacillus velezensis* UFV 3918 E DIFERENTES DOSES DE FOSFATO MONOAMÔNICO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva

Botucatu

2023

S237s

Santos, Hariane Luiz

Solubilização de fósforo em cana-de-açúcar submetida a *Bacillus velezensis* UFV 3918 e diferentes doses de fosfato monoamônico / Hariane Luiz Santos. -- Botucatu, 2023

172 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Marcelo de Almeida Silva

1. *Saccharum* spp.. 2. bactérias solubilizadoras de fosfato. 3. eficiência fotossintética. 4. nutrição. 5. indicadores microbiológicos do solo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

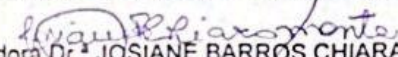
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDA
A *Bacillus velezensis* UFV 3918 E DIFERENTES DOSES DE FOSFATO
MONOAMÔNICO

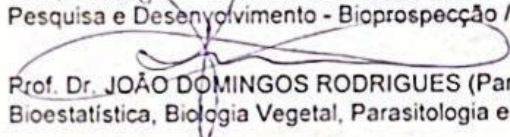
AUTORA: HARIANE LUIZ SANTOS

ORIENTADOR: MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Agricultura),
pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA (Participação Presencial)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias de Botucatu


Pesquisadora Dr.ª JOSIANE BARROS CHIARAMONTE (Participação Presencial)
Pesquisa e Desenvolvimento - Bioprospecção / Vittia Fertilizantes e Biológicos S.A.


Prof. Dr. JOÃO DOMINGOS RODRIGUES (Participação Presencial)
Bioestatística, Biologia Vegetal, Parasitologia e Zoologia / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Botucatu, 03 de março de 2023

*Aos meus amados pais, Clemencia e José,
que são meus maiores incentivadores,*

dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser tão misericordioso e ter me sustentado em todos os momentos.

Aos meus pais, Clemencia e José, e aos meus irmãos, Hariadne e Victor, pelo carinho e apoio incondicional durante essa etapa e pela compreensão nos momentos em que estive ausente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva, por ser um exemplo de profissional e pelos ensinamentos, paciência, atenção, amizade e confiança depositada durante o mestrado.

Ao meu padrinho, Natanael Ferreira Costa (*in memorian*), pelo carinho, inspiração e por ter sido um dos meus maiores incentivadores.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Agricultura), pela oportunidade de realização do mestrado e pela infraestrutura disponibilizada.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de mestrado (Processo nº 2021/02991-0).

Ao Grupo Vittia, pelo fornecimento do produto utilizado e financiamento do experimento conduzido.

À equipe do Laboratório de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura (LECA), que foi fundamental em todas as etapas de condução da pesquisa, em especial ao Gustavo Ferreira da Silva, que foi meu braço direito em todas as análises realizadas.

Ao Laboratório de Microbiologia Agrícola e Ambiental (LAMAA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela parceria nas análises dos indicadores microbiológicos do solo, em especial ao professor Adão de Siqueira Ferreira, pelos conhecimentos compartilhados e auxílio na condução das análises.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal (Agricultura), pelo suporte técnico durante a execução do experimento.

Ao Gustavo Ferreira da Silva, integrante do Laboratório de Fitometria, por toda a ajuda na condução da análise multivariada dos dados.

Ao Caio Nascimento Fernandes pela ajuda na instalação do sistema de irrigação.

À Melina Rodrigues Alves Carnietto por todo o companheirismo e amizade e por ter compartilhado comigo todos os momentos intensos da pós-graduação, tornando essa jornada mais leve.

E a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização desta pesquisa.

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

“O papel dos infinitamente pequenos na natureza é infinitamente grande”. Louis Pasteur.

DOBOS, R. Pasteur e a Ciência Moderna. São Paulo: Edart, 1967. p. 57.

“O Mestre na arte da vida faz pouca distinção entre o seu trabalho e o seu lazer, entre a sua mente e o seu corpo, entre a sua educação e a sua recreação, entre o seu amor e a sua religião. Ele dificilmente sabe distinguir um corpo do outro. Ele simplesmente persegue sua visão de excelência em tudo que faz, deixando para os outros a decisão de saber se está trabalhando ou se divertindo. Ele acha que está sempre fazendo as duas coisas simultaneamente”.

JACKS, L. P. Education Through Recreation. London: University of London Press, 1932. 148 p.

RESUMO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) possui destaque internacional devido à crescente demanda mundial por açúcar e etanol provenientes de fontes renováveis, sendo uma cultura bioenergética promissora para reduzir a dependência do petróleo bruto e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a adubação é um dos fatores mais importantes para atingir altas produtividades, especialmente a fosfatada, visto que o fósforo (P) está envolvido em vários processos metabólicos das plantas e é um dos nutrientes que mais limita a produção e longevidade dos canaviais. Neste sentido, a inoculação de bactérias pode ser uma alternativa, uma vez que algumas cepas apresentam capacidade de hidrolisar compostos insolúveis de P orgânico e inorgânico para uma forma solúvel e assimilável pelas plantas, além de produzirem fitohormônios responsáveis pelo crescimento vegetal, fornecendo uma abordagem ecologicamente correta e economicamente viável para superar a fixação do P e sua subsequente absorção pelas plantas. Partindo-se do pressuposto que a bactéria pode permitir a redução das doses de P, sem prejudicar a eficiência fotossintética e a produção da cana-de-açúcar, a presente pesquisa foi realizada com o objetivo de analisar as respostas morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e nutricionais da cana-de-açúcar, bem como avaliar as respostas químicas e microbiológicas do solo, à inoculação de *Bacillus velezensis* UFV 3918 e diferentes doses de fosfato monoamônico (MAP). O experimento foi conduzido em ambiente protegido, em delineamento inteiramente casualizado com seis tratamentos [Testemunha absoluta (TA) – sem MAP; Testemunha comercial (TC) – dose recomendada de MAP (3/3 MAP); *Bacillus velezensis* UFV 3918 (Bv); Bv+1/3 MAP; Bv+2/3 MAP; Bv+3/3 MAP)] e quatro repetições. No capítulo 1 foram avaliadas variáveis de brotação, biometria, densidade estomática, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, pigmentos fotossintéticos, bem como teores de proteínas, açúcares e aminoácidos e atividade da fosfatase ácida foliar e rendimento e partição de biomassa. E no capítulo 2 foram avaliadas variáveis radiculares, teores de macro e micronutrientes no solo e nos tecidos vegetais, eficiência do uso de nutrientes, eficiência de adaptação a disponibilidade de P, acúmulo de nutrientes, absorção de nutrientes por comprimento radicular e indicadores microbiológicos. A associação de *B. velezensis* e doses reduzidas de P (Bv e Bv+1/3 MAP) promoveu incremento no crescimento, evidenciado pela altura da planta, área foliar e biomassa da parte aérea, equivalendo-se às plantas

conduzidas com 100% da dose recomendada de MAP, além de proporcionar aumento da eficiência instantânea de carboxilação e das variáveis bioquímicas foliares. Além disso, Bv e Bv+1/3 MAP incrementaram o volume de raízes, o acúmulo de P na parte aérea e a absorção de macro e micronutrientes, bem como aumentaram a respiração basal do solo e as atividades da diacetato de fluoresceína, urease e fosfatase ácida, em relação à TC. O uso de *B. velezensis* UFV 3918 e doses reduzidas de fosfato melhorou a eficiência fotossintética e a produção de biomassa da cana-de-açúcar, além de beneficiar a atividade microbiana e enzimática do solo, o que refletiu na absorção de nutrientes, evidenciando que esta é uma estratégia para a adubação da cana-de-açúcar com impacto econômico e ambiental reduzido.

Palavras-Chave: *Saccharum* spp.; bactérias solubilizadoras de fosfato; eficiência fotossintética; nutrição; indicadores microbiológicos do solo; produção.

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum* spp.) has international prominence due to the growing worldwide demand for sugar and ethanol from renewable sources; being a promising bioenergy crop to reduce dependence on crude oil and mitigate greenhouse gas emissions. However, fertilization is one of the most critical factors to achieving high yields, especially phosphate fertilization, since phosphorus (P) is involved in several metabolic processes in plants and is one of the nutrients that most limit the yield and longevity of sugarcane fields. In this sense, inoculation of bacteria can be an alternative since some strains can hydrolyze insoluble compounds of organic and inorganic P to a soluble form that can be assimilated by plants, besides producing phytohormones responsible for plant growth, providing an ecologically correct and economically viable approach to overcome the fixation of P and its subsequent uptake by plants. Based on the assumption that the bacteria can allow the reduction of P doses, without harming the photosynthetic efficiency and production of sugarcane, the present research was conducted to analyze the morphological, physiological, biochemical, and nutritional responses of sugarcane, as well as evaluate the chemical and microbiological responses of the soil, to the inoculation of *Bacillus velezensis* UFV 3918 and different doses of mono ammonium phosphate (MAP). The experiment was conducted in a protected environment, in an entirely randomized design with six treatments [absolute control (AC); commercial control (CC) (recommended dose of MAP - 3/3 MAP); *B. velezensis* UFV 3918 (Bv); Bv+1/3 MAP; Bv+2/3 MAP and Bv+3/3 MAP] and four replicates. In chapter 1, sprouting variables, biometrics, stomatal density, gas exchange, chlorophyll a fluorescence, photosynthetic pigments, as well as protein, sugar, and amino acid contents and leaf acid phosphatase activity and biomass yield and partitioning were evaluated. And in chapter 2, root variables, soil and plant tissue macro and micronutrient content, nutrient use efficiency, P availability adaptation efficiency, nutrient accumulation, nutrient uptake by root length, and microbiological indicators were evaluated. The association of *B. velezensis* and reduced doses of P (Bv and Bv+1/3 MAP) promoted growth increment, evidenced by plant height, leaf area, and shoot biomass, equivalent to plants grown with 100% of the recommended dose of MAP, besides providing an increase in instantaneous carboxylation efficiency and leaf biochemical parameters. In addition, Bv and Bv+1/3 MAP increased root volume, shoot P accumulation, and macro- and micronutrient uptake by roots, as well

as increased soil basal respiration, and fluorescein diacetate, urease, and acid phosphatase activities compared to the CC. Using *B. velezensis* UFV 3918 and reduced doses of phosphate improved the photosynthetic efficiency and biomass production of sugarcane, besides benefiting soil microbial and enzymatic activity, which reflected in nutrient uptake, evidencing that this is a strategy for sugarcane fertilization with reduced economic and environmental impact.

Keywords: *Saccharum* spp.; phosphate solubilizing bacteria; photosynthetic efficiency; nutrition; soil microbiological indicators; yield.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1 – *Bacillus velezensis* UFV 3918 ASSOCIADO À DOSE REDUZIDA DE FOSFATO AUMENTA A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E A BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR

- Figura 1 – Temperatura média, máxima e mínima do ar e umidade relativa média no interior do ambiente protegido durante o período experimental46
- Figura 2 – %Brotação (A), velocidade de brotação (VB) (B) e índice de velocidade de brotação (IVB) (C) de gemas de cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)47
- Figura 3 – Curvas de regressão ao longo das épocas de avaliação (30, 60, 90, 120, 150 e 180 DAP) para altura do colmo (A), diâmetro do colmo (B), número de perfilhos (C) e área foliar (D) da cana-de-açúcar sob a associação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)48
- Figura 4 – Densidade estomática da face adaxial (DEAD) (A) e densidade estomática da face abaxial (DEAB) (B) de folhas de cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP), aos 60, 118 e 180 DAP50
- Figura 5 – Taxa relativa de transporte de elétrons (ETR) (A), rendimento quântico potencial do FSII (F_v'/F_m') (B), extinção fotoquímica (qP) (C), extinção não fotoquímica (NQP) (D), rendimento quântico máximo variável do FSII (F_v/F_m) (E) e respiração noturna (R_d) (F) de plantas de cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP), aos 60, 118 e 180 DAP51
- Figura 6 – Assimilação instantânea de CO₂ (A) (A), condutância estomática (g_s) (B), taxa transpiratória (E) (C), concentração interna de carbono (C_i) (D), eficiência instantânea do uso da água (EUA) (E) e eficiência instantânea de carboxilação (EC) (F) de plantas de cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP), aos 60, 118 e 180 DAP.....53
- Figura 7 – Teores de clorofila *a* (Chl_a) (A), clorofila *b* (Chl_b) (B) e clorofila total (Chl total) (C), razão Chl_a/Chl_b (D), índice SPAD (E) e teor de carotenoides (F) de plantas de cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP), aos 60, 118 e 180 DAP.....55
- Figura 8 – Teor de proteína (A), açúcares solúveis totais (B), aminoácidos totais (C) e atividade da fosfatase ácida (D) em folhas de cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)57

Figura 9 – Aspecto visual da parte aérea do colmo principal (folhas, bainhas e colmos) e sistema radicular de plantas de cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)	58
Figura 10 – Biomassa foliar (BF), biomassa de bainhas (BB), biomassa de colmos (BC) e biomassa radicular (BR) de plantas de cana-de-açúcar aos 180 DAP, sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)	59
Figura 11 – Biomassa da parte aérea (BPA), biomassa total (BT) e relação biomassa de parte aérea e biomassa radicular (BPA/BR) de plantas de cana-de-açúcar aos 180 DAP, sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)	61
Figura 12 – Partição da biomassa da parte aérea (A) e da biomassa total (B) de plantas de cana-de-açúcar aos 180 DAP, sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)	62
Figura 13 – Cargas de variáveis das componentes de morfologia (A), fisiologia aos 60 DAP (B), 118 DAP (C), e 180 DAP (D), bioquímica (E) e biomassa (F)	64
Figura 14 – Dispersão de observações na primeira componente das componentes principais de morfologia (A), fisiologia aos 60 DAP (B), 118 DAP (C) e 180 DAP (D), bioquímica (E) e biomassa (F)	65
Figura 15 – Correlação de Pearson entre as primeiras componentes principais de cada grupo de variáveis	66

Capítulo 2 – *Bacillus velezensis* UFV 3918 MELHORA A ABSORÇÃO E ACÚMULO DE FÓSFORO E OUTROS NUTRIENTES NA CANA-DE-AÇÚCAR E BENEFICIA A SAÚDE DO SOLO

Figura 1 – Teores de matéria orgânica (MO) (A), potássio (K) (B), cálcio (Ca) (C), magnésio (Mg) (D), enxofre (S) (E), fósforo (P) (F), ferro (Fe) (G), zinco (Zn) (H), manganês (Mn) (I) e cobre (Cu) (J) no solo após 180 dias de cultivo com cana-de-açúcar, sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)	110
Figura 2 – Teores de potássio (K) (A), nitrogênio (N) (B), cálcio (Ca) (C), magnésio (Mg) (D), enxofre (S) (E), fósforo (P) (F) nas folhas, bainhas, raízes e colmos da cana-de-açúcar após 180 dias de cultivo, sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)	112

- Figura 3 – Teores de ferro (Fe) (A), zinco (Zn) (B), manganês (Mn) (C), boro (B) (D) e cobre (Cu) (E) nas folhas, bainhas, raízes e colmos da cana-de-açúcar após 180 dias de cultivo, sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)114
- Figura 4 – Eficiência do uso do potássio (K) (A), nitrogênio (N) (B), cálcio (Ca) (C), magnésio (Mg) (D), enxofre (S) (E), fósforo (P) (F), ferro (Fe) (G), zinco (Zn) (H), manganês (Mn) (I), boro (B) (J) e cobre (Cu) (K) da cana-de-açúcar, sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)116
- Figura 5 – Eficiência de adaptação à disponibilidade de fósforo (EADP) da cana-de-açúcar, sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)117
- Figura 6 – Acúmulo de potássio (K) (A), nitrogênio (N) (B), cálcio (Ca) (C), magnésio (Mg) (D), enxofre (S) (E), fósforo (P) (F), ferro (Fe) (G), zinco (Zn) (H), manganês (Mn) (I), boro (B) (J) e cobre (Cu) (K) na parte aérea da cana-de-açúcar, sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)118
- Figura 7 – Respiração basal do solo (RBS) acumulada em 21 dias (A), RBS por dia (B), carbono (CBM) e nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) (C–D), hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) (E) e atividade da desidrogenase (DHA) em solo cultivado com de cana-de-açúcar, sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP), 180 dias após o plantio122
- Figura 8 – Atividade das enzimas urease (A), arilsulfatase (B), B-glicosidase (C) e fosfatase ácida (D) em solo cultivado com de cana-de-açúcar, sob tratamentos com e sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP), 180 dias após o plantio124
- Figura 9 – Cargas de variáveis das componentes de química do solo PC1 (A), química do solo PC2 (B), teores de nutrientes nas folhas (C), bainhas (D), raízes (E) e colmos (F)126
- Figura 10 – Cargas de variáveis das componentes de variáveis radiculares (A), eficiência do uso de nutrientes (B), acúmulo de nutrientes (C), absorção de nutrientes por comprimento radicular (D) e indicadores microbiológicos (E).....127
- Figura 11 – Dispersão de observações na primeira componente das componentes principais de química do solo PC1 (A), química do solo PC2 (B), teores de nutrientes nas folhas (C), bainhas (D), raízes (E) e colmos (F).....129
- Figura 12 – Dispersão de observações na primeira componente das componentes principais de variáveis radiculares (A), eficiência do uso de nutrientes (B), acúmulo de nutrientes (C), absorção de nutrientes por comprimento radicular (D) e indicadores microbiológicos (E).....130

Figura 13 – Correlação de Pearson entre os primeiros componentes principais de cada grupo de variáveis.....131

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1 – *Bacillus velezensis* UFV 3918 ASSOCIADO À DOSE REDUZIDA DE FOSFATO AUMENTA A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E A BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Tabela 1 – Análise química inicial do solo e doses dos fertilizantes adicionados no plantio	39
Tabela 2 – Porcentagem de explicação da primeira componente dos grupos de variáveis morfologia, fisiologia 60 DAP, fisiologia 118 DAP, fisiologia 180 DAP, bioquímica e biomassa	62
Tabela S1 – Equações de regressão da altura do colmo, diâmetro do colmo, número de perfilhos e área foliar da cana-de-açúcar sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP) ao longo das épocas de avaliação (30, 60, 90, 120, 150 e 180 DAP)	170

Capítulo 2 – *Bacillus velezensis* UFV 3918 MELHORA A ABSORÇÃO E ACÚMULO DE FÓSFORO E OUTROS NUTRIENTES NA CANA-DE-AÇÚCAR E BENEFICIA A SAÚDE DO SOLO

Tabela 1 – Análise química inicial do solo e doses dos fertilizantes adicionados no plantio	102
Tabela 2 – Comprimento radicular (CR), volume radicular (VR), diâmetro médio de raízes (DR) e biomassa radicular (BR) da cana-de-açúcar 180 dias após o plantio, sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP)	109
Tabela 3 – Absorção de nutrientes por comprimento radicular da cana-de-açúcar cultivada sob tratamentos com e sem inoculação de <i>B. velezensis</i> UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato monoamônico (MAP), 180 dias após o plantio	120
Tabela 4 – Porcentagem de explicação das componentes do grupo de variáveis radiculares, química do solo, teor de nutrientes nas folhas, bainhas, raízes e colmos, eficiência do uso de nutrientes, acúmulo de nutrientes, absorção	

de nutrientes por comprimento radicular e indicadores
microbiológicos.....125

Tabela S1 – Equações de regressão para os teores de ferro (Fe), zinco (Zn),
manganês (Mn), boro (B) e cobre (Cu) nas folhas, bainhas, raízes e colmos
da cana-de-açúcar após 180 dias de cultivo, sob tratamentos com e sem
inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato
monoamônico (MAP)171

Tabela S2 – Equações de regressão para a absorção de macro e micronutrientes por
comprimento radicular da cana-de-açúcar cultivada sob tratamentos com e
sem inoculação de *B. velezensis* UFV 3918 (Bv) e doses de fosfato
monoamônico (MAP), aos 180 dias após o plantio172

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Assimilação líquida de CO ₂
AC	Altura do colmo
AcNu	Acúmulo de nutrientes (“Nu” substitui cada nutriente)
AF	Área foliar
ANuCR	Absorção de nutrientes por comprimento radicular (“Nu” substitui cada nutriente)
Ba(OH) ₂	Hidróxido de bário
BB	Biomassa de bainhas
BC	Biomassa de colmos
BF	Biomassa foliar
BPA	Biomassa da parte aérea
BR	Biomassa radicular
BSA	Albumina sérica bovina (BSA)
BSP	Bactéria solubilizadora de fosfato
BT	Biomassa total
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
CBM	Carbono da biomassa microbiana
Chl _a	Clorofila <i>a</i>
Chl _{a+b}	Clorofila total
Chl _b	Clorofila <i>b</i>
C _i	Concentração interna de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CR	Comprimento radicular
CTC	Capacidade de troca catiônica
CuSO ₄	Sulfato de cobre II
DC	Diâmetro do colmo
DEAB	Densidade estomática da face abaxial
DEAD	Densidade estomática da face adaxial
DHA	Desidrogenase
DMF	Dimetilformamida
DR	Diâmetro médio das raízes
DTPA	Dietilenotriaminopentacético

E	Taxa transpiratória
EAA	Espectrofotometria de absorção atômica
EADP	Eficiência de adaptação à disponibilidade de fósforo
EC	Eficiência instantânea de carboxilação
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
ETR	Taxa relativa de transporte de elétrons
EUA	Eficiência instantânea do uso da água
EUNu	Eficiência do uso de nutrientes (“Nu” substitui cada nutriente)
F_0	Fluorescência mínima
FDA	Diacetato de fluoresceína
F_m	Fluorescência máxima
F_m'	Fluorescência máxima em amostra adaptada à luz
FSII	Fotossistema II
F_v/F_m	Rendimento quântico máximo variável do FSII
F_v'/F_m'	Rendimento quântico potencial do FSII
g_s	Condutância estomática
HCl	Ácido clorídrico
INT	2-p-iodofenil-3-p-nitrofenil- 5-feniltetrazólio
INTF	Iodo-nitrofenilformazan
IRGA	Analizador de gases a infravermelho
IVB	Índice de velocidade de brotação
$K_2Cr_2O_7$	Dicromato de potássio
K_2SO_4	Sulfato de potássio
KCl	Cloreto de potássio
MAP	Fosfato monoamônico
MF	Matéria fresca
MO	Matéria orgânica
MS	Matéria seca
Na_2CO_3	Carbonato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBM	Nitrogênio da biomassa microbiana
NP	Número de perfilhos
NQP	Extinção não fotoquímica
P	Fósforo

PMSF	Fluoreto de fenilmetilsulfonil
PNF	<i>p</i> -nitrofenil
PNFG	<i>p</i> -nitrofenil- β -D-glucopiranósido
pNPP	<i>p</i> -nitrofenil fosfato dissódico
PVPP	Polivinilpirrolidona
qP	Extinção fotoquímica
RBS	Respiração basal do solo
R_d	Respiração na ausência de luz
SB	Soma de bases
SR	Sistema radicular
TEA	Trietanolamina
TUM	Tampão universal modificado
UFC	Unidades formadoras de colônia
V%	Saturação por bases
VB	Velocidade de brotação
VR	Volume radicular

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	27
CAPÍTULO 1 – Bacillus velezensis UFV 3918 ASSOCIADO À DOSE REDUZIDA DE FOSFATO AUMENTA A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E A BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	33
1.1 INTRODUÇÃO.....	35
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
1.2.1 Condições de cultivo e material vegetal.....	37
1.2.2 Descrição, obtenção e procedência do produto.....	38
1.2.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	38
1.2.4 Avaliações morfológicas.....	40
1.2.5 Avaliações fisiológicas.....	41
1.2.6 Avaliações bioquímicas.....	42
1.2.7 Rendimento e partição de biomassa.....	44
1.2.8 Análise estatística.....	44
1.3 RESULTADOS.....	45
1.3.1 Condições ambientais durante o experimento.....	45
1.3.2 Avaliações morfológicas.....	47
1.3.3 Avaliações fisiológicas.....	49
1.3.4 Avaliações bioquímicas.....	54
1.3.5 Rendimento e partição de biomassa.....	58
1.3.6 Análise das componentes principais.....	62
1.4 DISCUSSÃO.....	67
1.5 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS.....	77
CAPÍTULO 2 – Bacillus velezensis UFV 3918 MELHORA A ABSORÇÃO E ACÚMULO DE FÓSFORO E OUTROS NUTRIENTES NA CANA-DE-AÇÚCAR E BENEFICIA A SAÚDE DO SOLO.....	95
2.1 INTRODUÇÃO.....	97
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	99
2.2.1 Condições de cultivo e material vegetal.....	99

2.2.2	Descrição, obtenção e procedência do produto.....	100
2.2.3	Tratamentos e delineamento experimental.....	100
2.2.4	Variáveis radiculares.....	101
2.2.5	Amostragem e análise química do solo.....	101
2.2.6	Amostragem, análise química e variáveis nutricionais do tecido vegetal.....	103
2.2.7	Indicadores microbiológicos do solo.....	104
2.2.8	Análise estatística.....	107
2.3	RESULTADOS.....	108
2.3.1	Variáveis radiculares.....	108
2.3.2	Química do solo.....	108
2.3.3	Variáveis nutricionais do tecido vegetal.....	111
2.3.4	Indicadores microbiológicos do solo.....	121
2.3.5	Análise das componentes principais.....	125
2.4	DISCUSSÃO.....	132
2.5	CONCLUSÕES.....	142
	REFERÊNCIAS.....	143
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
	REFERÊNCIAS.....	165
	APÊNDICE A – Material suplementar do capítulo 1.....	170
	APÊNDICE B – Materiais suplementares do capítulo 2.....	171

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é uma planta perene pertencente ao gênero *Saccharum* L., tribo Andropogoneae e família Poaceae (LUCCHESI, 2001; MOORE et al., 2014). Essa cultura é utilizada para produzir uma variedade de produtos alimentícios, incluindo açúcar, melaço e xaropes. Além disso, a cana-de-açúcar é uma das culturas bioenergéticas mais promissoras para reduzir a dependência do petróleo bruto e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (JAISWAL et al., 2017), devido ao seu rápido crescimento, alto rendimento e excelente balanço energético (MUÑOZ et al., 2014).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e possui destaque internacional na exportação dessa *commodity*, principalmente devido às grandes áreas agricultáveis e condições edafoclimáticas favoráveis ao seu cultivo, tornando-o um país essencial para suprir o aumento da demanda mundial por açúcar e etanol proveniente de fontes renováveis (CONAB, 2019).

A estimativa brasileira de produção de cana-de-açúcar na safra 2022/2023 é de 572,9 milhões de toneladas, tendo como principal região produtora a Sudeste, que poderá atingir 355,5 milhões de toneladas colhidas, com destaque para os estados de São Paulo e Minas Gerais (CONAB, 2022).

No entanto, a adubação é um dos fatores mais importantes para atingir altas produtividades, o que torna essencial o estudo do manejo da fertilização, principalmente com o fósforo (P), que é um nutriente que limita a produção e longevidade dos canaviais, sobretudo em regiões tropicais, devido ao alto grau de interação com o solo, e pelo fato de ser um insumo mineral finito e insubstituível (MALAVOLTA, 2006; RAIJ, 2011; SOLTANGHEISI et al., 2019).

O P é indispensável para o crescimento e reprodução das plantas, as quais não atingem o máximo potencial produtivo sem um fornecimento nutricional adequado (MARSCHNER, 2012). Este nutriente é constituinte de compostos das células vegetais, tais como ácidos nucléicos, fosfolipídios das membranas celulares, ATP (adenosina trifosfato) e ADP (adenosina difosfato), assim como de muitas coenzimas e fosfoproteínas, além disso, interfere nos processos de divisão celular, fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia (GRANT, 2001; MALAVOLTA, 2006; TAIZ et al., 2017).

Na cana-de-açúcar, apesar de ser absorvido em menores quantidades, quando comparado ao nitrogênio (N) e ao potássio (K), a importância do P consiste no fato deste nutriente participar, direta e indiretamente, de muitos processos metabólicos, sendo essencial para que haja boa formação inicial e desenvolvimento do sistema radicular, brotação e perfilhamento adequado, o que reflete tanto na produtividade de colmos, como na qualidade tecnológica e longevidade do canavial (BASTOS et al., 2008; ROSSETTO et al., 2010; KINGSTON, 2014; SILVA et al., 2019).

Entretanto, o P tem sido o nutriente mais crítico nas adubações nos últimos anos no Brasil, devido à sua alta interação com o solo e à alta taxa de retenção de seus íons (CAIONE et al., 2015; BORGES et al., 2019). A parcela inorgânica de P no solo é dividida em fase líquida e fase sólida. Como consequência das reações de equilíbrio nos solos ácidos, o P encontra-se na solução do solo, predominantemente, como íons ortofosfato, enquanto na fase sólida do solo, este encontra-se combinado, principalmente, com metais, como o ferro (Fe) e o alumínio (Al), e com o cálcio e a matéria orgânica (RAIJ, 2001; MATOS et al., 2017; NASCIMENTO et al., 2018), o que reduz a sua disponibilidade, especialmente em solos intemperizados (WITHERS et al., 2018; ASOMANING, 2020; HANYABUI et al., 2020), limitando o crescimento da cana-de-açúcar.

A fração sólida mais disponível para as plantas é considerada lábil, ao passo que a fração fortemente adsorvida ou precipitada em compostos insolúveis é considerada não lábil (SÁ, 2004). Os solos brasileiros são ricos em óxidos de Fe e Al que, junto com a caulinita, correspondem à maior porção da composição mineralógica da fração de argila do solo, isto é, a porção mais ativa, em que ocorrem as reações do P com estes compostos (RAIJ, 2004; CAIONE et al., 2015).

A maior parte dos fertilizantes fosfatados solúveis que são aplicados ao solo dissolve-se, move-se para a solução do solo, mas, como consequência da baixa solubilidade dos compostos formados e da forte possibilidade de adsorção, permanece retida na fase sólida como P lábil, migrando gradualmente a P não lábil (NOVAIS et al., 2007; RAIJ, 2011). Isto demonstra que, em nossos solos, prevalecem as formas orgânicas com estabilidade química e física e as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia (RHEINHEIMER et al., 2008).

Além da problemática que envolve os solos brasileiros, mais de 70% dos fertilizantes minerais fosfatados utilizados na agricultura brasileira são importados e há uma preocupação global com os custos e a energia envolvidos na mineração do

fosfato e seu transporte das fábricas às lavouras, visto que trata-se de um recurso finito e de uma atividade que não é economicamente viável nem ecologicamente correta, apresentando como restrições a emissão de flúor como gás fluoreto de hidrogênio, o descarte de gesso e a acumulação de cádmio e outros metais pesados no solo e, possivelmente, nas colheitas, resultante do uso repetitivo de fertilizantes fosfatados (SHARMA et al., 2013; MENG et al., 2019).

Atualmente, o grande desafio da produção agrícola é tornar a agricultura mais sustentável, maximizando os benefícios líquidos que a sociedade recebe de sua produção, incluindo alimentos, fibras e energia, e reduzindo a degradação ambiental. Um solo saudável atua como um sistema vivo e dinâmico que beneficia o ecossistema através da manutenção da qualidade da água e da produtividade das culturas e do controle da ciclagem de nutrientes do solo (TAHAT et al., 2020).

A saúde do solo está intimamente associada à agricultura sustentável, porque a diversidade e a atividade dos microrganismos do solo são os principais componentes da saúde do solo (TAHAT et al., 2020). Nesse sentido, para atender a demanda de P durante o desenvolvimento da planta, visando à redução de perdas do nutriente, estudos têm demonstrado que alguns microrganismos podem melhorar a eficiência do uso do P no sistema solo-planta (MEENA et al., 2015; KUMAR et al., 2017; BILLAH et al., 2019; ESTRADA-BONILLA et al., 2021; AFZAL et al., 2022).

Os microrganismos solubilizadores de fosfato têm sido vistos como os melhores meios ecológicos na nutrição de P para as culturas (SHARMA et al., 2013; BILLAH et al., 2019; ESTRADA-BONILLA et al., 2021; AFZAL et al., 2022), pois através de diversos mecanismos de solubilização e mineralização, como a liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular e atividade enzimática (DASH et al., 2017; ZHU et al., 2018), são capazes de converter P orgânico e inorgânico do solo em uma forma disponível, possibilitando a absorção pelas raízes das plantas e reduzindo a dependência de fertilizantes fosfatados químicos (KHAN et al., 2009; SPOLAOR et al., 2016; SHEN et al., 2016). Dentre esses microrganismos, as bactérias do gênero *Bacillus* estão entre as mais abundantes na rizosfera e são consideradas bactérias solubilizadoras de fósforo (BSF) promissoras (SAEID et al., 2018).

Além disso, as comunidades microbianas do solo realizam processos essenciais durante a decomposição da matéria orgânica e solubilização de nutrientes, influenciando a produtividade das culturas (BALD et al., 2021; SANTOS et al., 2022). A atividade dessas comunidades no solo pode ser avaliada para entender os

mecanismos de ação das bactérias na solubilização do P. Essas avaliações podem ser realizadas por meio de indicadores microbiológicos, atividade de enzimas ligadas a ciclos biogeoquímicos de nutrientes e atividade de enzimas do metabolismo intracelular das bactérias (SOBUCKI et al., 2021).

Estudos já evidenciaram aumentos na produção de milho (KAUR; REDDY, 2014), arroz (COSTA et al., 2015), feijão mungu (HASSAN et al., 2017), soja (ZOHAIB et al., 2019), batata (UYSAL; KANTAR, 2020) e cana-de-açúcar (ROSA et al., 2020; PINJAI e AYE, 2021; ROSA et al., 2022) com o uso de diferentes BSP como biofertilizante. Além disso, Chungopast et al. (2021) verificaram aumentos na disponibilidade de P para a cana-de-açúcar por meio das BSP, mas a sua capacidade de substituir, mesmo que em parte, os insumos de fertilizantes fosfatados ainda precisa ser estudada.

Com base no contexto apresentado, percebe-se que a eficiência da fertilização fosfatada e, conseqüentemente, a brotação e o desenvolvimento da cana-de-açúcar, são altamente dependentes das características químicas e microbiológicas do solo. Para que haja aumento da disponibilidade de fósforo pode ser viável utilizar BSP. Conhecer o potencial da bactéria no aumento da disponibilidade de fósforo, bem como seu efeito nos processos metabólicos da planta através de análises morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e microbiológicas, pode auxiliar na correta recomendação de produtos biológicos e ainda, auxiliar pesquisas futuras que visem reduzir a utilização de fertilizantes fosfatados.

Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o potencial de *Bacillus velezensis* cepa UFV 3918 no aumento da disponibilidade de fósforo no solo, seu efeito sobre as respostas morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e de produção da cana-de-açúcar e sobre os indicadores microbiológicos de saúde do solo, bem como obter a dose adequada de fosfato monoamônico (MAP) para a cana-de-açúcar.

Hipotetizou-se que ocorreria aumento do teor de fósforo na parte aérea e do fósforo disponível no solo e que as variáveis influenciadas por este nutriente seriam favorecidas com a inoculação de *Bacillus velezensis* UFV 3918, em comparação aos tratamentos sem BSP, e que este microrganismo seria eficiente em reduzir a diferença normalmente observada entre as doses crescentes de fertilizante fosfatado.

Para testar esta hipótese, a pesquisa foi dividida em dois capítulos, sendo o capítulo 1 destinado a avaliar o desempenho da cultura da cana-de-açúcar durante o desenvolvimento vegetativo inicial, após a inoculação com *B. velezensis* e adubação

fosfatada, por meio de análises morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e de produção. Já o capítulo 2 foi designado a avaliar o efeito de *B. velezensis* e da adubação fosfatada na nutrição e variáveis radiculares da cana-de-açúcar e na química e microbiologia do solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inoculação de *Bacillus velezensis* UFV 3918 nos minitoletes de cana-de-açúcar, associada ou não a doses reduzidas de fosfato (Bv, Bv+1/3 MAP e Bv+2/3 MAP), melhorou as propriedades microbiológicas do solo, com o aumento da respiração basal do solo e da atividade das enzimas de solo, que juntamente com os fitohormônios produzidos pelas bactérias, estimularam o aumento do volume radicular e, conseqüentemente, favoreceram a absorção e acúmulo de nutrientes na parte aérea, tais como K, P, Fe, B e Cu, e aumentaram a eficiência do uso do S e do Mg. Além da inoculação ter aumentado a atividade da fosfatase ácida, o que possibilitou a solubilização de fosfato e garantiu maiores teores de P no solo, também promoveu maior absorção e acúmulo de Fe na parte aérea, demonstrando um potencial da cepa UFV 3918 de sintetizar sideróforos.

A produção de fitohormônios promotores do crescimento e o aumento da disponibilidade de nutrientes favoreceram o aumento da área foliar e da densidade estomática, proporcionando incrementos nos teores de pigmentos fotossintéticos e na taxa de assimilação de CO₂, fatores que contribuíram para o aumento da eficiência de carboxilação e garantiram o sucesso da produção de biomassa da parte aérea em Bv e Bv+1/3 MAP. Além disso, *B. velezensis* promoveu aumentos nos teores de açúcares e aminoácidos totais e na atividade da fosfatase ácida foliar, refletindo a regulação do metabolismo celular e o potencial de solubilização de fósforo (P).

Neste estudo, o alto teor de P inicial permitiu que inoculação da cepa UFV 3918 dispensasse a adubação fosfatada sem prejudicar a eficiência fotossintética e a produção de biomassa, além de garantir bom desempenho dos indicadores microbiológicos e proporcionar maior acúmulo de P na parte aérea da cana-de-açúcar. Entretanto, de modo geral, à medida que houve aumento das doses de fosfato monoamônico, ocorreu tendência de redução no potencial produtivo e eficiência nutricional, portanto, em solos com teores muito altos de P, recomenda-se o uso de *B. velezensis* isolado ou associado com 1/3 da dose recomendada de MAP.

Esses resultados têm implicações importantes para o ecossistema e para a sustentabilidade, uma vez que o P é um dos nutrientes mais limitantes nos sistemas de cultivo agrícola, especialmente em condições tropicais, além de ser um nutriente finito, insubstituível e altamente demandado pelos canaviais. Portanto, a inoculação com *B. velezensis* UFV 3918 é uma estratégia viável para otimizar o uso de

fertilizantes fosfatados na cultura da cana-de-açúcar e os resultados fornecem apoio a pesquisas futuras que visem reduzir a utilização de fertilizantes fosfatados.

REFERÊNCIAS

- AFZAL, A.; BAHADER, S.; HASSAN, T. U.; NAZ, I.; DIN, A.-u. Rock Phosphate Solubilization by Plant Growth-Promoting *Bacillus velezensis* and Its Impact on Wheat Growth and Yield. **Geomicrobiology Journal**, Nova Iorque, 2022.
- ASOMANING, S.K. Processes and factors affecting phosphorus sorption in soils. *In*: KYZAS, G.; LAZARIDIS, N. **Sorption in 2020s**. IntechOpen: London, 2020. p. 1–15.
- BALD, D. R.; RANGEL, C. P.; VARGAS, A.; GIRÃO, K. T.; PASSAGLIA, L. M. P. Microbiota do solo: A diversidade invisível e a sua importância. **Bio Diverso**, Rio Grande do Sul, v. 1, n. 1, p. 101–131, 2021.
- BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; SOUTO, J. S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 12, n. 2, p. 136–142, 2008.
- BILLAH, M.; MATIULLAH, K.; BANO, A.; HASSAN, T. U.; MUNIR, A.; GURMANI, A. R. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. **Geomicrobiology Journal**, Nova Iorque, v. 36, n. 10, p. 904–916, 2019.
- BORGES, B. M. M. N.; ABDALA, D. B.; SOUZA, M. F.; VIGLIO, L. M.; COELHO, M. J. A.; PAVINATO, P. S.; FRANCO, H. C. J. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. **Geoderma**, Amsterdã, v. 339, p. 20–30, 2019.
- CAIONE, G.; PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S.; MODA, L. R.; VASCONCELOS, R. L.; PIZAULO JÚNIOR, J. M. Response of sugarcane in a red ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. **The Scientific World Journal**, Nova Iorque, v. 2–3, p. 1–10, 2015.
- CHUNGOPAST, S.; THONGJOO, C.; ISLAM, A. K. M. M.; YEASMIN, S. Efficiency of phosphate-solubilizing bacteria to address phosphorus fixation in Takhli soil series: a case of sugarcane cultivation, Thailand. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 460, n. 1–2, p. 1–11, 2021.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**: Cana-de-Açúcar, Brasília, DF, v. 6, n. 1, p. 1–58, maio 2019. Safra 2019/20, Primeiro levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar?start=10>. Acesso em: 09 dez. 2022.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**: Cana-de-Açúcar, Brasília, DF, v. 9, n. 2, p. 1–59, ago. 2022. Safra de 2022/23, Segundo levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar?limitstart=0>. Acesso em: 09 dez. 2022.

COSTA, E. M.; LIMA, W.; OLIVEIRA-LONGATTI, S. M.; SOUZA, F. M. Phosphate-solubilizing bacteria enhance *Oryza sativa* growth and nutrient accumulation in an oxisol fertilized with rock phosphate. **Ecological Engineering**, Amsterdã, v. 83, p. 380–385, 2015.

DASH, N.; PAHARI, A.; DANGAR, T. K. Functionalities of Phosphate-Solubilizing Bacteria of Rice Rhizosphere: Techniques and Perspectives. *In*: SHUKLA, P. **Recent advances in Applied Microbiology**. Singapore: Springer, 2017. p. 151–163.

ESTRADA-BONILLA, G. A.; DURRER, A.; CARDOSO, E. J. B. N. Use of compost and phosphate-solubilizing bacteria affect sugarcane mineral nutrition, phosphorus availability, and the soil bacterial community. **Applied Soil Ecology**, Amsterdã, v. 157, n. 103760, 2021.

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

HANYABUI, E.; APORI, S. O.; FRIMPONG, K. A.; ATIAH, K.; ABINDAW, T.; ALI, M.; ASIAMA, J. Y.; BYALEBEKA, J. 2020. Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, Springfield, v. 5, p. 599–616, 2020.

HASSAN, W.; BASHIR, S.; HANIF, S.; SHER, A.; SATTAR, A.; WASAYA, A.; ATIF, H.; HUSSAIN, M. Phosphorus solubilizing bacteria and growth and productivity of mung bean (*Vigna radiata*). **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 49, n. 3, p. 331–336, 2017.

JAISWAL, D.; DE SOUZA, A. P.; LARSEN, S.; LEBAUER, D. S.; MIGUEZ, F. E.; SPAROVEK, G.; BOLLERO, G.; BUCKERIDGE, M. S.; LONG, S. P. Brazilian sugarcane ethanol as an expandable green alternative to crude oil use. **Nature Climate Change**, Londres, v. 7, n. 11, p. 788–792, 2017.

KAUR, G.; REDDY, M. S. Influence of P-solubilizing bacteria on crop yield and soil fertility at multilocal sites. **European Journal of Soil Biology**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 61, p. 35–40, 2014.

KHAN, A. A.; JILANI, G.; AKHTAR, M. S.; NAQVI, S. M. S.; RASHEED, M. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, Ma'an, v. 1, n. 1, p. 48–58, 2009.

KINGSTON, G. Mineral Nutrition of Sugarcane. *In*: MOORE, P. H.; BOTHERA, F. C. (eds.). **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. New York: Wiley Blackwell, 2014. p. 85–115.

KUMAR, A.; MAURYA, B. R.; RAGHUWANSHI, R.; MEENA, V. S.; ISLAM, M. T. Co-inoculation with *Enterobacter* and *Rhizobacteria* on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) in the alluvial soil under Indo-Gangetic plain of India. **Journal of Plant Growth Regulation**, Nova Iorque, v. 36, n. 3, p. 608–617, 2017.

LUCCHESI, A. A. Cana-de-açúcar. *In*: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. (eds.). **Ecofisiologia de culturas extrativistas: cana-de-açúcar, seringueira, coco, dendê e oliveira**. Piracicaba: Cosmópolis Stoller do Brasil, 2001. p. 13–45.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2012.

MATOS, C. H. L.; MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; RIBEIRO NASCIMENTO, P. P. R.; PEREIRA, R. A. Phosphorus adsorption in soils under forest and savanna from Northern Amazon, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, PR, v. 38, n. 5, p. 2909–2920, 2017.

MEENA, R. S.; MEENA, V. S.; MEENA, S. K.; VERMA, J. P. The needs of healthy soils for a healthy world. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 102, p. 560–561, 2015.

MENG, X.; HUANG, Q.; XU, J.; GAO, H.; YAN, J. A review of phosphorus recovery from different thermal treatment products of sewage sludge. **Waste Disposal and Sustainable Energy**, Hangzhou, v. 1, p. 99–115, 2019.

MOORE, P. H.; PATERSON, A. H.; TEW, T. Sugarcane: The Crop, the Plant, and Domestication. *In*: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (eds.). **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. Oxford, UK: John Wiley & Sons, 2014. v.1, cap. 1, p. 1–15.

MUÑOZ, I.; FLURY, K.; JUNGBLUTH, N.; RIGARLSFORD, G.; CANALS, L.; KING, H. 2014. Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 19, n. 1, p. 109–119, 2014.

NASCIMENTO, C. A. C.; PAGLIARI, P. H.; FARIA, L. A.; VITTI, G. C. Phosphorus mobility and behavior in soils treated with calcium, ammonium, and magnesium phosphates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 82, n. 3, p. 622–631, 2018.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F.; Alvarez, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471–550.

PINJAI, P.; AYE, P. P.; TAWORNPRUEK, S. Effect of phosphorus solubilizing bacteria on soil available phosphorus and growth and yield of sugarcane. **Walailak Journal of Science and Technology**, Nakhon Si Thammarat, v. 18, n. 12, p. 10754, 2021.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute, 2011.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, SP: Potafos/Anda, 2004. cap. 3, p. 107–116.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, SP: Instituto Agronômico de Campinas, 2001.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 38, n. 2, p. 576–586, 2008.

ROSA, P. A. L.; GALINDO, F. S.; OLIVEIRA, C. E. S.; JALAL, A.; MORTINHO, E. S.; FERNANDES, G. C.; MAREGA, E. M. R.; BUZETTI, S.; TEXEIRA FILHO, M. C. M. Inoculation with plant growth-promoting bacteria to reduce phosphate fertilization requirement and enhance technological quality and yield of sugarcane. **Microorganisms**, Basel, v. 10, n. 1, p. 192, 2022.

ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E. S.; JALAL, A.; GALINDO, F. S.; BUZETTI, S.; FERNANDES, G. C.; BARCO NETO, M.; PAVINATO, P. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Inoculation with growth-promoting bacteria associated with the reduction of phosphate fertilization in sugarcane. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 8, n. 32, p. 1–18, 2020.

ROSSETTO, R. R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; PRADO JUNIOR, J. P. Q. Fósforo. *In*: DINARDO MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (eds.). **Cana-de-açúcar**. Campinas, SP: Instituto Agronômico de Campinas, 2010. p. 271–288.

SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, SP: Potafos/Anda, 2004. cap. 7, p. 201–222.

SAEID, A.; PROCHOWNIK, E.; DOBROWOLSKA-IWANEK, J. Phosphorus Solubilization by *Bacillus* Species. **Molecules**, Basel, v. 23, n. 11, p. 2897, 2018.

SANTOS, H. L.; SILVA, G. F.; CARNIETTO, M. R. A.; OLIVEIRA, L. C.; NOGUEIRA, C. H. C.; SILVA, M. A. *Bacillus velezensis* associated with organomineral fertilizer and reduced phosphate doses improves soil microbial-chemical properties and biomass of sugarcane. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 11, p. 2701, 2022.

SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **Springer Plus**, Heidelberg, v. 2, n. 587, p. 1–14, 2013.

SHEN, H.; HE, X.; LIU, Y.; CHEN, Y.; TANG, J.; GUO, T. A complex inoculant of N₂-fixing, P- and K-solubilizing bacteria from a purple soil improves the growth of kiwifruit

(*Actinidia chinensis*) plantlets. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 7, n. 198, p. 841, 2016.

SILVA, A. M. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; WILLADINO, L. G.; FREIRE, F. J.; ROCHA, A. T. Corrective phosphate application as a practice for reducing oxidative stress and increasing productivity in sugarcane. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v. 50, n. 2, p. 188–196, 2019.

SOBUCKI, L.; RAMOS, R. F.; MEIRELES, L. A.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 45, n. e0210109, p. 1–18, 2021.

SOLTANGHEISI, A.; WITHERS, P.; PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; ROSSETTO, R.; DO CARMO, J. B.; ROCHA, G. C.; MARTINELLI, L. A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Global Change Biology – Bioenergy**, Chichester, v. 11, n. 12, p. 1444–1455, 2019.

SPOLAOR, L. T.; GONÇALVES, L. S. A.; SANTOS, O. J. A. P. D.; OLIVEIRA, A. L. M. D.; SCAPIM, C. A.; BERTAGNA, F. A. B.; KUKI, M. C. Plant growth-promoting bacteria associated with nitrogen fertilization at topdressing in popcorn agronomic performance. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 75, n. 1, p. 33–40, 2016.

TAHAT, M. M.; ALANANBEH, K. M.; OTHMAN, Y. A.; LESKOVAR, D. I. Soil health and sustainable agriculture. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 12, p. 4859, 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2017.

UYSSAL, A.; KANTAR, F. Effect of *Bacillus subtilis* and *Bacillus amyloliquefaciens* culture on the growth and yield of off-season potato (*Solanum tuberosum* L.). **Acta Agronômica**, Palmira, v. 69, n. 1, p. 26–31, 2020.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, Londres, v. 8, n. 2537, p. 1–13, 2018.

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 612, p. 522–537, 2018.

ZOHAIB, A.; YOUSAF, S.; ANJUM, S. A.; TABASSUM, T.; ABBAS, T.; MUZAFFAR, W.; IKRAM, W. Growth, allometry and dry matter yield of soybean genotypes in response to seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria. **Pakistan Journal of Agricultural Research**, Islamabad, v. 32, n. 1, p. 102–109, 2019.