

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**FONOLITO COMO FONTE ALTERNATIVA DE POTÁSSIO NA CULTURA DA
CANA-DE-AÇÚCAR**

RAFAEL MARANGONI MONTES

RAFAEL MARANGONI MONTES

**FONOLITO COMO FONTE ALTERNATIVA DE POTÁSSIO NA CULTURA DA
CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, área de concentração em Fitotecnia/Solos, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira

Co-orientador

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M779f Montes, Rafael Marangoni, 1988-
2022 Fonolito como fonte alternativa de potássio na cultura da cana-de-
açúcar [recurso eletrônico] / Rafael Marangoni Montes. - 2022.

Orientador: Hamilton Seron Pereira.
Coorientador: Gaspar Henrique Korndörfer.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.8023>
Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Pereira, Hamilton Seron, 1968-, (Orient.). II.
Korndörfer, Gaspar Henrique, 1953-, (Coorient.). III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV.
Título.

CDU: 631

André Carlos Francisco
Bibliotecário - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia
 Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppga.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Tese, 03/2022, PPGAGRO				
Data:	Trinta de julho de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11813AGR007				
Nome do Discente:	Rafael Marangoni Montes				
Título do Trabalho:	Fonolito como fonte alternativa de nutrientes na cana de açúcar				
Área de concentração:	Solos				
Linha de pesquisa:	Uso e Recuperação de Solos e Resíduos na Agricultura				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Gaspar Henrique Korndorfer - UFU; Wedisson Oliveira Santos - UFU; Carlos Alexandre Costa Crusciol - UNESP; Luiz Roberto Guimarães Guilherme - UFPA; Hamilton Seron Pereira - UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Hamilton Seron Pereira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Hamilton Seron Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/08/2022, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º,



§ 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wedisson Oliveira Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/08/2022, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gaspar Henrique Korndörfer, Usuário Externo**, em 08/08/2022, às 17:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Roberto Guimarães Guilherme, Usuário Externo**, em 12/08/2022, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alexandre Costa Crusciol, Usuário Externo**, em 18/08/2022, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3799913** e o código CRC **EC14A29F**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à sociedade brasileira pela oportunidade de realizar o doutorado em uma instituição pública brasileira, e espero que este trabalho possa contribuir com o desenvolvimento da agricultura e da nossa nação, assim como contribuiu para a minha formação técnica.

À minha família, por sempre me incentivar a caminhar em busca do conhecimento. Em especial para minha mãe, que além de mãe, é uma grande amiga, exemplo de ser humano, colega de profissão e pesquisadora. À minha esposa, minha companheira dedicada e amiga, por me acompanhar e me incentivar no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos professores, funcionários técnico-administrativos, graduandos e pós-graduandos da UFU, com os quais tive a oportunidade de conviver, obrigado por esses momentos, com destaque ao Gustavo, Camila, Luis Henrique e Barbara, que contribuíram com o desenvolvimento desse trabalho, e ao Professor Gilberto Fernandes Correa, que se prontificou em ajudar a classificar os solos dos experimentos, indo até os locais de cada experimento. E às demais pessoas que contribuíram direta e indiretamente com essa etapa da minha vida.

À Usina Santo Ângelo e à KP Consultoria, pela parceria no desenvolvimento desse projeto. À Yoorin Fertilizantes e todos os seus funcionários, pelo apoio, convívio e conhecimentos compartilhados, em especial ao Alfredo Yuji Ieiri, pela confiança, amizade, convivência e pelo apoio na realização desse projeto.

À família Curimbaba, em especial ao Sr. Sebastião Curimbaba, que com seus 99 anos de idade continua sendo empresário, produtor rural, exemplo de dedicação, seriedade, trabalho e Presidente Diretor do Grupo Curimbaba, detentor da Yoorin Fertilizantes, uma empresa que tenho muito a agradecer.

Por fim, aos professores Hamilton Seron Pereira e Gaspar Henrique Korndörfer, pela confiança, ensinamentos, orientação e paciência.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	i
GENERAL ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3. REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 2 - Fonolito de Poços de Caldas como fonte de potássio para cultivo de cana planta	30
RESUMO	30
ABSTRACT	31
4. INTRODUÇÃO	32
5. MATERIAL E MÉTODOS	33
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
7. CONCLUSÕES.....	59
8. REFERÊNCIAS	59
CAPÍTULO 3 - Fonolito de Poços de Caldas como fonte de potássio para cultivo de cana soca	64
RESUMO	64
ABSTRACT	65
9. INTRODUÇÃO	66
10. MATERIAL E MÉTODOS	67
11. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
12. CONCLUSÕES.....	91
13. REFERÊNCIAS	91

RESUMO GERAL

MONTES, RAFAEL MARANGONI. **Fonte alternativa de potássio na cultura da cana-de-açúcar**. 2022. 94p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia¹.

O Brasil, um dos principais países produtores mundiais de alimentos, fibras e energia, apresenta enorme dependência de importação de insumos para a produção de suas safras, principalmente dos fertilizantes. Do montante de fertilizantes utilizado pelo Brasil no ano 2021, 85% foram provenientes de importação, mostrando a alta dependência que o país apresenta. A oscilação dos preços desses insumos como também a disponibilidade afetou diretamente a estabilidade nacional. Com o objetivo de investigar o potencial de utilização do fonolito de Poços de Caldas-MG, como fonte de potássio, foram montados dois experimentos a nível de campo, com a cultura da cana-de-açúcar. No município de Campo Florido-MG, foi instalado um experimento em cana planta, variedade CTC 9002, em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico com baixa concentração de potássio, avaliando-se doses (60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O) e fontes de potássio (fonolito, fonolito com cloreto de potássio (KCl) e KCl). O segundo experimento foi instalado no município de Veríssimo-MG, utilizando-se a variedade CTC 4, em um Latossolo Vermelho distroférico com baixa concentração de potássio, avaliando-se doses (60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O) e fontes de potássio (fonolito e KCl) em cana soca de segundo corte. Apesar de não terem sido observadas diferenças significativas para as fontes, observa-se que o fonolito e o fonolito com KCl, no primeiro experimento, e o fonolito, no segundo experimento, apresentaram resultados equivalentes ao KCl em relação as concentrações foliares de K, Na, Si, Cu, Fe, Mn, Zn, produtividade de colmos, açúcar total recuperável e produtividade de açúcar, tanto para cana planta como cana soca. A adubação com potássio proporcionou aumento da produtividade de colmos, ATR e produtividade de açúcar, tanto no efeito direto, como também para o efeito residual e no efeito acumulativo. No segundo experimento, o fonolito proporcionou incremento nas concentrações de silício e potássio no solo após 2 anos de cultivo de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: remineralizador, fertilizante, silício, macronutriente, agromineral

¹Orientador: Hamilton Seron Pereira (UFU)

GENERAL ABSTRACT

MONTES, RAFAEL MARANGONI. **Phonolite as alternative potassium source in sugarcane crop**. 2022. 94p. Thesis (Doctorate's degree in Agronomy) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia¹.

Brazil, one of the world's main producers of food, fiber and energy, is highly dependent on imported inputs for the production of its crops, mainly fertilizers. Of the amount of fertilizers used by Brazil in 2021, 85% came from imports, showing the high dependence that the country has. Oscillations in the prices of these inputs, as well as their availability, directly affected national stability. With the objective of investigating the potential use of the phonolite from Poços de Caldas-MG, as a source of potassium, two experiments were set up at field level, with sugarcane cultivation. In the municipality of Campo Florido-MG, an experiment was set up with cane plants, variety CTC 9002, in a Dystrophic Red-Yellow Latosol with low potassium concentration, evaluating doses (60, 120 and 240 kg ha⁻¹ of K₂O) and potassium sources (phonolite, phonolite with potassium chloride (KCl) and KCl). The second experiment was installed in the municipality of Veríssimo-MG, using the CTC 4 variety, in a dystroferric Red Latosol with low potassium concentration, evaluating doses (60, 120 and 240 kg ha⁻¹ of K₂O) and sources of potassium (phonolite and KCl) in second-cut ratoon cane. Despite not having been observed significant differences for the sources, it is observed that the phonolite and the phonolite with KCl, in the first experiment, and the phonolite, in the second experiment, presented equivalent results to the KCl in relation to the foliar concentrations of K, Na, Si, Cu, Fe, Mn, Zn, culm productivity, total recoverable sugar and sugar productivity, both for plant and ratoon cane. Potassium fertilization provided an increase in stalk productivity, ATR and sugar productivity, both in the direct effect, as well as for the residual effect and the cumulative effect. In the second experiment, the phonolite provided an increase in silicon and potassium concentrations in the soil after 2 years of sugarcane cultivation.

Keywords: remineralizer, rock dust, silicon, fertilizer, macronutrient

¹Advisor: Hamilton Seron Pereira (UFU)

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura brasileira apresentou um grande desenvolvimento durante os últimos 100 anos, obtendo aumentos significativos na produtividade de um grande número de culturas, notadamente nas últimas três décadas (LOPES & GUILHERME, 2009), quando o Brasil passou de importador a um dos maiores exportadores de alimentos do mundo (EMBRAPA, 2018). Isto foi resultado de uma série de inovações tecnológicas que surgiram baseadas em inúmeras pesquisas e também na difusão do uso dessas técnicas (LOPES & GUILHERME, 2009), bem como também da disponibilidade de água e de áreas para a expansão agrícola, para atender à crescente demanda mundial por alimentos (EMBRAPA, 2018).

Solos férteis permitiram o desenvolvimento de civilizações e a criação de riquezas em inúmeras regiões do mundo. Contudo, no Brasil, a existência de fertilidade natural para solos produtivos não é mais uma necessidade, já que a tecnologia moderna, com o uso de fertilizantes e corretivos, tornou produtivos solos antes considerados impróprios para a produção agrícola (RAIJ, 2011).

O Brasil destaca-se como um dos maiores polos agrícolas do mundo, principalmente através da produção de soja, milho e cana-de-açúcar. A cana-de-açúcar destaca-se como uma das espécies mais importantes para a produção de açúcar e bioenergia no mundo, sendo o Brasil o maior produtor (NACHILUK, 2021; WU et al., 2020), seguido pela Índia e China (WU et al., 2020).

Historicamente, a produtividade agrícola brasileira tem mantido estreita e direta relação com a utilização de adubos. Ao longo das últimas cinco décadas, a produção das principais culturas vem aumentando em paralelo com o crescimento no consumo de fertilizantes. (EMBRAPA, 2018). No ano de 2021, o Brasil consumiu 45,8 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo que 85% desses fertilizantes foram importados, sendo o potássio o nutriente mais dependente de importação, alcançando a marca de 95% (ANDA, 2022).

Dada a escassez de minérios de potássio tradicionais no Brasil, com o agravante de tal fato se verificar em todo o Hemisfério Sul, e a forte dependência do País de importações de matérias-primas para fertilizantes, com reflexo negativo na balança comercial, há necessidade de se buscarem caminhos e encontrar soluções alternativas que resolvam o problema, não só por razões econômicas, mas também estratégicas (NASCIMENTO & LAPIDO-LOUREIRO, 2009). É necessário que a agricultura brasileira seja considerada um assunto de segurança nacional, que leve as autoridades a estabelecerem políticas agrícolas de mais longo prazo, para que a nossa

vocação agrícola seja exercida em sua plenitude e não por meio de implantação de programas do tipo “apaga incêndio”, deixando o futuro em aberto, ou, o que é na verdade pior, fechando as perspectivas que se vislumbram bastante promissoras para o Brasil (LOPES & GUILHERME, 2009).

A técnica da rochagem, baseada na aplicação de rochas moídas e sua dissolução pela ação das raízes das plantas e comunidades microbianas, pode ser uma alternativa aos métodos tradicionais de melhoria do solo, pois diversos produtos podem ser utilizados como uma fonte de nutrientes para as plantas, além de poderem elevar o pH do solo e também alterar a mineralogia do solo, resultando em rejuvenescimento geológico e na melhoria da fertilidade do solo, devido ao aumento da capacidade de troca catiônica. Além disso, os efeitos benéficos dos pós de rocha não se restringem apenas à esfera local, pois podem afetar o balanço de carbono (GRANADA et al., 2021).

Existem várias rochas silicáticas abundantes e com possibilidade de uso como fontes de potássio em sua forma moída, sendo essas, alternativas que podem fornecer nutrientes em complementação ao manejo nutricional, o que pode diminuir a dependência de importação de fertilizantes (RESENDE et al., 2005). A aplicação dessas rochas nas lavouras é uma prática agrícola de longa data que economiza custos de produção por ser um produto simples, alternativo e com baixo custo de processamento (MANCUSO et al., 2014).

Os minerais silicatados têm um papel particular a desempenhar como fertilizantes em condições tropicais (MANNING, 2018), pois essas rochas são formadas por minerais que possuem dissolução relativamente lenta no seu estado natural. Por apresentarem liberação lenta, podem reduzir o número de adubações feitas durante um ciclo da cultura, atendendo melhor a necessidade de cada cultura, diminuindo possíveis danos causados às raízes pela alta concentração de sais e com distribuição mais homogênea dos nutrientes, favorecendo o fornecimento e a demanda fisiológica da planta, reduzindo assim os custos de produção e a lixiviação de íons para o lençol freático (ROSSA, 2008).

O intemperismo/dissolução desses materiais é um processo no qual a água, o ar e os organismos interagem com as rochas e os minerais expostos ao ambiente externo, alterando suas estruturas físicas e composições químicas (BÜDEL et al., 2004), disponibilizando K de minerais portadores de K, como K-feldspato, mica e illita no solo (BENNETT et al., 1998). A liberação de K não-trocável de minerais requer baixa concentração de K na solução do solo, que pode ser induzida pela zona de depleção de K usualmente formada na rizosfera pela absorção vegetal. Essa liberação de K não-trocável induzida pelas raízes pode contribuir com mais de 80% da absorção das plantas, mesmo em solos onde se presumia que essa liberação fosse negligenciada, quando

considerada a concentração de K na solução do solo fora da rizosfera (HINSINGER, 1998). Nesse processo, os microrganismos secretam compostos orgânicos que agem como agentes quelantes e rapidamente dissolvem a rocha, liberando finalmente os íons K no solo (BENNETT et al., 1998). Dessa forma, a disponibilidade de K para as plantas aumenta de acordo com as reações de troca e dissolução mineral na rizosfera (FAGERIA et al., 2009).

Existem diversas rochas presentes no Brasil com possibilidade de utilização como fonte de nutriente, principalmente pensando no potássio, embora também devam ser considerados outros nutrientes que possam estar presentes em formas passíveis de serem utilizadas pelas plantas. O planalto de Poços de Caldas-MG dispõe de grandes reservas de rochas com boa concentração de potássio, com teores que podem chegar a 14% de K₂O. Além de estar geograficamente bem posicionado próximo às grandes regiões produtoras do Brasil, as reservas dessa região são superficiais e apresentam boa homogeneidade. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do fonolito de Poços de Caldas-MG como fonte de potássio no cultivo de cana-de-açúcar, analisando ainda o potencial dessa fonte no fornecimento de outros nutrientes importantes para essa cultura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil

Um dos segmentos mais importantes do agronegócio nacional, o setor sucroalcooleiro observou significativa expansão da produção de cana-de-açúcar a partir da segunda metade da década de 2000. De acordo com o CONAB (2022), a área de cana-de-açúcar colhida em hectare, de 2006 a 2015, aumento de 5.800 ha para pouco mais de 9.000 ha. Após esse período de expansão, a área cultivada apresenta uma tendência de queda, tendo como estimativa para a safra 21/22 de uma área de 8.264,4 mil hectares, com uma produção de 568.430,2 mil toneladas de cana em 2022, proporcionando uma produtividade média estimada de 68.780 kg ha⁻¹ (Figura 1). A diminuição da área de cultivo está relacionada ao aumento da rentabilidade das culturas da soja e do milho, as quais competem com a cana-de-açúcar.

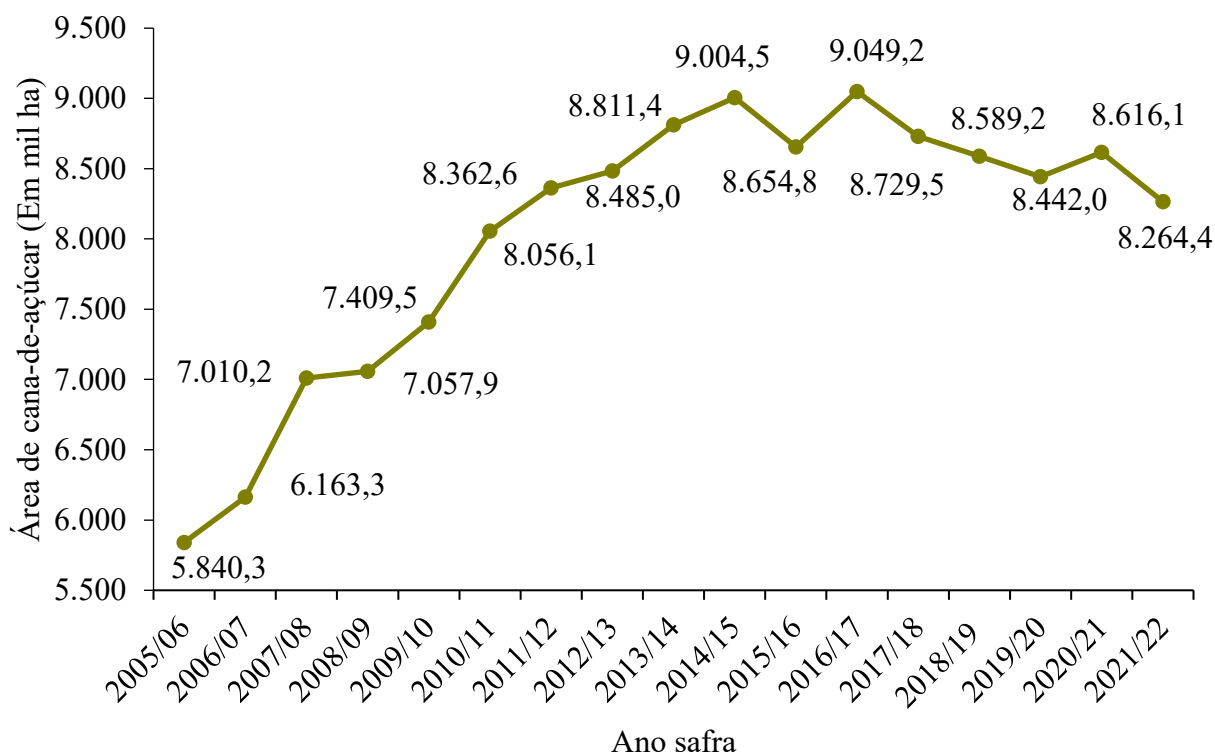


Figura 1. Evolução de área de cultivo de cana-de-açúcar (CONAB, 2022).

A cana-de-açúcar é uma das principais alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial de produção de etanol, açúcar e dos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, grande parte das unidades de produção têm realizado a geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade (CONAB, 2022).

Um dos nutrientes mais requeridos pela cana-de-açúcar é o potássio, sendo este o mais absorvido, estando presente no metabolismo da planta, além de auxiliar na resistência de pragas e a seca, e de estimular o acúmulo de açúcar (DREYER et al., 2017). Estimando-se que a dose média utilizada no Brasil de potássio na cana-de-açúcar seja 100 kg de K_2O ha^{-1} , seriam necessárias 826,6 mil toneladas de K_2O , ou o equivalente de 1,377 milhões de toneladas de cloreto de potássio com concentração de 60% K_2O , para atender as necessidades dessa última safra.

2.2. Mercado brasileiro de fertilizantes

O Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, sendo o quarto país do mundo, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. A velocidade de crescimento da demanda brasileira tem superado o crescimento da oferta nacional e seu atendimento tem ocorrido via aumento de importações. O país deixou de ser exportador de fertilizantes para ser grande

importador entre 1992 e 2020 (BRASIL, 2020). O Brasil se tornou um grande produtor de alimentos para o mundo e também dos grandes atores para a segurança alimentar global. Porém, a produção agrícola cresceu dependente dos fertilizantes importados nesses últimos anos.

No ano de 2021, a produção nacional foi responsável por apenas 6,99 milhões de toneladas de fertilizantes, de um volume de fertilizantes entregue ao mercado de 45,85 milhões de toneladas. Para suprir essa alta demanda, fez-se necessário a importação de 39,20 milhões de toneladas, resultando em um estoque de passagem de 7,27 milhões de toneladas para o ano de 2021. A entregas de fertilizantes em 2021 foram 12,38% superior ao de 2020 (ANDA, 2022).

Na figura 2, verifica-se que o consumo de fertilizantes pelo mercado brasileiro cresceu de cerca de 31 milhões de toneladas no ano de 2013 para 45,8 milhões de toneladas no ano de 2022, chamando atenção para aumento da importação e diminuição da produção brasileira desses insumos.

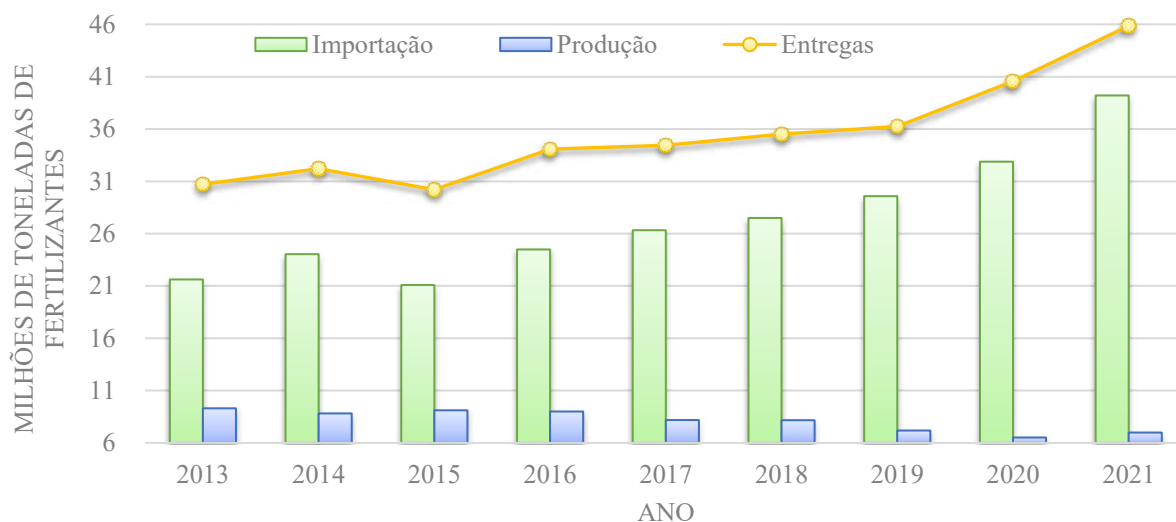


Figura 2. Volumes de entregas, produção e importação de fertilizantes por ano no Brasil (ANDA, 2022).

O mercado mundial de fertilizantes, que já enfrentava consecutivos e fortes aumentos nos preços ao longo de 2021, ficou ainda mais apreensivo a partir de março de 2022, tendo em vista o conflito no leste europeu, região que é uma das maiores fornecedoras globais de fertilizantes e de gás natural. A dependência nacional de fertilizantes estrangeiro ficou ainda mais evidente em 2021, quando a União Europeia (UE) impôs sanção econômica sobre Belarus e impediu a exportação do fertilizante potássico por meio dos países membros da UE. Mais recentemente, com a guerra entre a Rússia e a Ucrânia, a UE impôs sanção econômica ao país russo, o que deve limitar ainda mais a oferta desse fertilizante para o mundo (OSAKI, 2022).

Dentre os principais fertilizantes importados está o cloreto de potássio, sendo que 96% do volume desse produto consumido no Brasil é importado. Por sua vez, apenas quatro países são responsáveis por quase 80% da produção mundial: Canadá (32%), Belarus (18%), Rússia (18%) e China (12%). Em 2021, o Brasil importou cerca de 12,8 milhões de toneladas de cloreto de potássio, sendo que 32,6% vieram do Canadá, 28,2%, da Rússia e 18,7%, de Belarus (OSAKI, 2022).

O conflito entre Rússia e Ucrânia expôs claramente a vulnerabilidade do nosso sistema produtivo no tocante a fertilizantes. Trata-se de uma questão mais ampla, que se agravou com a queda da confiabilidade de se ter no mercado externo importante fonte de suprimentos em geral – no caso, fertilizantes em especial. De imediato, rearranjos no padrão de trocas comerciais se fazem necessários. A produção nacional de fertilizantes é questão estratégica e precisa ser avaliada com presteza, tendo em vista a definição de como ela será implementada. Complexidades de natureza político-institucional e socioambientais precisam ser tratadas tendo em conta os interesses nacionais numa gama de questões inter-relacionadas (OSAKI, 2022).

2.3. Potássio

Dentre os principais minerais essenciais, o potássio (K) é o segundo nutriente mais absorvido pelas plantas (EPSTEIN & BLOOM, 2006; RAIJ, 2011) e o cátion mais abundante nos tecidos das plantas (CAKMAK, 2005), sendo fundamental para as funções de ativação enzimática, transporte dos aminoácidos e açúcares para órgãos de armazenamento, com participação nos processos abertura e fechamento de estômatos e na regulação osmótica (MALAVOLTA, 2006; CAKMAK, 2005).

A natureza cíclica das transferências e transformações de K na produção agrícola tem sido descrito em reservatórios de K no sistema solo-planta e com fluxos de K entre esses reservatórios dentro de um determinado volume de solo por um período de tempo especificado. O potássio do solo tem sido tradicionalmente retratado como residindo em quatro *pools* funcionais: K na solução do solo, K trocável, K intercadas (às vezes chamado de “fixo” ou “não trocável”) e K estrutural em minerais primários. No entanto, este modelo de quatro *pools* e a terminologia associada criaram confusão na compreensão da dinâmica do fornecimento de K às plantas e o destino do K devolvido ao solo em fertilizantes, resíduos ou produtos residuais (BROUDER et al., 2021; RAIJ, 2011).

Brouder et al. (2021) descrevem o ciclo do potássio no solo composto por seis reservatórios, no qual a estrutura distingue entre micas e feldspatos como minerais primários

portadores de K, com base na presença de K em posições intercamadas ou estruturas tridimensionais, respectivamente; identifica um pool de K em minerais secundários neoformados que podem incluir produtos de reação de fertilizantes; e substitui o reservatório de K “trocável” por um reservatório definido como K “adsorvido na superfície”, identificando onde o K está localizado e o mecanismo pelo qual ele é retido, em vez de identificação com base em procedimentos específicos de teste de solo (BROUDER et al., 2021), como apresentado na figura 3.

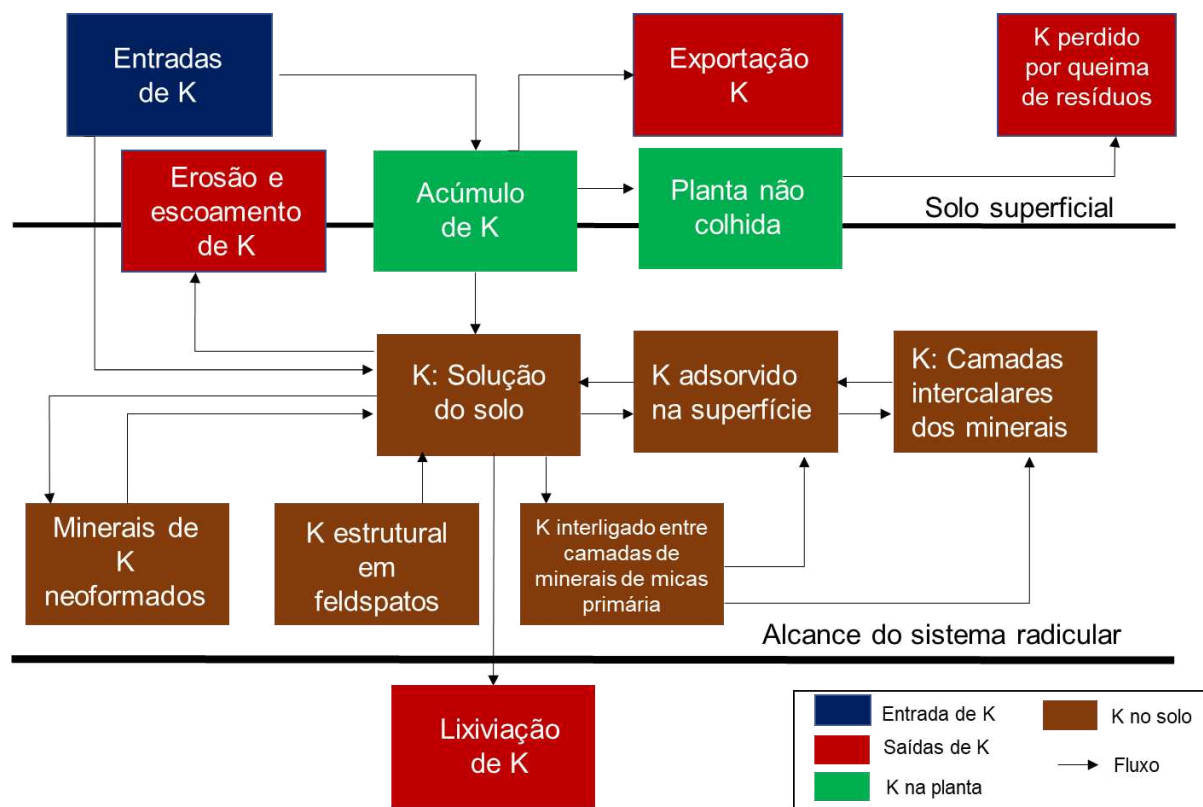


Figura 3. O ciclo do potássio. Os componentes são indicados por retângulos e são quantidades de K em um ou mais tipos de localizações. Os fluxos são indicados por setas e são movimentos de K de uma piscina para outra. Este ciclo descreve seis reservatórios de solo K (referido aqui como o modelo de seis reservatórios de solo) (BROUDER et al., 2021).

O potássio que faz parte da estrutura dos feldspatos é a quantidade de K em estruturas de minerais tectossilicatos, principalmente feldspatos e feldspatoides. O K nestes minerais não está tão fortemente ligado como os outros elementos nas estruturas. Ao expor superfícies, a dissolução das estruturas pode permitir que outros cátions na solução do solo troquem por K^+ , movendo K^+ para a solução (BROUDER et al., 2021).

Pouca atenção tem sido dada aos minerais filossilicatos portadores de K e à relação entre a capacidade de liberação de K dos minerais filossilicatos contendo K sob cultivo e se sua liberação

de K é suficiente para o suprimento da necessidade de K da planta (LI et al., 2015). Mesmo sabendo que há muito é reconhecido que há um certo equilíbrio entre as várias formas de potássio no solo, em várias condições tem sido verificado que a quantidade de K extraída pelas plantas é superior às formas trocáveis, sendo substancial a contribuição das formas não-trocáveis no total deste nutriente absorvido pelas plantas (CURI et al., 2005). Assim, a investigação de minerais e rochas portadoras de K que podem ser usados diretamente no solo como fonte alternativa de potássio é um passo importante a ser investigado (LI et al., 2015).

Hinsinger et al. (2021) indicam que a depleção de K^+ induzida pela raiz altera o equilíbrio de troca, aumentando a dessorção de K, bem como a liberação de K não intercambiável de minerais na rizosfera. Ambos os *pools* podem ser biodisponíveis se as raízes das plantas puderem absorver quantidades significativas de K em baixas concentrações na solução do solo (na faixa micromolar). Além disso, as raízes podem acidificar significativamente seu ambiente ou liberar grandes quantidades de compostos orgânicos (exsudatos). Esses dois processos acabam por promover a dissolução de micas e feldspatos na rizosfera, contribuindo para a mineração estratégia desenvolvida pelas plantas. Além disso as plantas também desenvolveram várias estratégias de mineração para aumentar a biodisponibilidade de todos os reservatórios de K na rizosfera, devido à capacidade das raízes de sustentar altos fluxos de K em concentrações muito baixas na solução do solo. Isso induz uma mudança no equilíbrio de troca e uma maior dessorção de K trocável (K adsorvido na superfície de minerais argilosos e matéria orgânica), bem como uma liberação de K não intercambiável contido em minerais micáceos. Em segundo lugar, as raízes podem promover a dissolução de silicatos contendo K como micas e feldspatos através da acidificação da rizosfera e, ou, exsudação de ligantes complexantes, como alguns carboxilatos.

2.4. Fontes de potássio

O potássio é usado como fertilizante desde o século III a.C., na forma de adubo ou cinzas. Na América do Norte, os índios assim procediam, com cinzas de árvores, quando chegaram os primeiros colonizadores europeus. Nos séculos XVIII e XIX, o KCl era exportado em volumes substanciais da América do Norte para Inglaterra. A produção comercial em larga escala foi iniciada na Alemanha em meados do século XIX (NASCIMENTO & LAPIDO-LOUREIRO, 2009).

2.4.1. Fontes convencionais de potássio

Embora o potássio exista em numerosos minerais, apenas dois deles são largamente utilizados como minério: a silvita (KCl) e a carnalita (KMgCl₃.6H₂O), apesar de existirem outros sais de potássio, como os sulfatos langbainita (KMg₂(SO₄)₃), polihalita (K₂MgCa₂(SO₄)₄.2H₂O) e kainita (4KCl.4MgSO₄.11H₂O). Cloretos e sulfatos de potássio ocorrem em antigos lagos e extensos depósitos de origem marinha. Nestes casos, o potássio é recuperado com relativa facilidade. O problema é serem pouco abundantes e quase não existirem no Hemisfério Sul, onde há apenas uma mina em operação, a de Taquari-Vassouras, em Sergipe (NASCIMENTO & LAPIDO-LOUREIRO, 2009).

Apesar de existirem no mercado nacional outras opções de fertilizantes potássicos com solubilidade em água, que podem apresentar em sua composição outro nutriente (Tabela 1), o cloreto de potássio, proveniente da silvita ou obtido através do processamento da carnalita, é fonte de potássio mais utilizada no Brasil e no mundo, devido à sua solubilidade, concentração e principalmente em função do custo do nutriente.

Tabela 1. Fertilizantes potássicos tradicionais.

Nome do Fertilizante	Formula química	%K ₂ O
Cloreto de potássio (muriato de potássio)	KCl	58-63
Sulfato de potássio	K ₂ SO ₄	50
Nitrato de potássio	KNO ₃	45
Tiosulfato de potássio	K ₂ S ₂ O ₃	25
Langbeinita	K ₂ SO ₄ .MgSO ₄	21
Polihalita	K ₂ SO ₄ .MgSO ₄ .2CaSO ₄ .2H ₂ O	13
Hidróxido de potássio	KOH	83
Fosfato de potássio	KH ₂ PO ₄	34

Fonte: BRASIL (2018)

O uso do cloreto de potássio (KCl) predomina na agricultura brasileira, resultado da maior disponibilidade e da melhor relação custo-benefício (ECHER; FOLONI; CRESTE, 2009), porém constam na literatura, perdas por lixiviação de K na ordem de 50-70% (WU & LIU, 2008). No entanto, vários inconvenientes econômicos e ambientais associados à utilização de fertilizantes

convencionais tornam-se foco de preocupação em todo o mundo (JAMES & SOJKA, 2008; NI; LIU; LÜ, 2009).

O KCl, quando aplicado de forma inadequada aos solos, é perdido para o ambiente sem ser absorvido pelas plantas (SOUSA & REIN, 2009), o que provoca não só grandes perdas de recursos econômicos, mas também prejuízos ambientais devido à poluição dos recursos hídricos (GE et al., 2002; SHAVIT; REISS; SHAVIV, 2002). Além disso, a aplicação em excesso do KCl dificulta a absorção de água pelas sementes e pelas radículas, devido ao aumento da pressão osmótica externa às células (SANGOI et al., 2009), podendo provocar redução na germinação das sementes com consequente menor número de plantas por área.

2.4.2. Fontes alternativas de potássio

Nos últimos anos, a busca por fontes alternativas de potássio tem se intensificado devido ao aumento constante dos preços dos fertilizantes como também devido à grande dependência de importação desses insumos. A ciência tem atuado buscando identificar fontes que possam ajudar no suprimento e no uso eficiente e sustentável de nutrientes para a agricultura brasileira. Os remineralizadores, também conhecidos como pó de rocha ou agrominerais silicáticos, são apontados como uma opção, devido à abundância desse tipo de material distribuído no território brasileiro.

Rochagem, remineralização e pó de rocha (rock for crops) são termos utilizados para designar uma técnica de fertilização natural capaz de contribuir para recompor o perfil de nutrientes necessários a uma agricultura de alta produtividade, associada à qualidade, em solos empobrecidos pelo intemperismo/lixiviação ou pelo seu uso inadequado e intensivo (abusado) (LAPIDO-LOUREIRO & NASCIMENTO, 2009), sendo uma alternativa atraente ao uso de fertilizantes convencionais. Por ter uma solubilidade mais lenta que a dos fertilizantes comerciais, o pó de rocha se constitui em fonte de nutrientes para as plantas cultivadas durante longos períodos, promovendo o aumento da capacidade de troca de cátions dos solos, devido à formação de novos minerais de argila durante o processo de alteração da rocha (MELAMED et al., 2009).

O emprego do modelo de remineralização do solo com o uso de pó de rocha constitui-se também numa alternativa viável em termos econômicos e ecológicos, devido ao baixo custo do processo de beneficiamento, que envolve apenas moagem das rochas usadas na composição do produto, e devido à liberação gradual de nutrientes, que diminui as perdas por lixiviação e favorece uma ação de longo prazo do insumo aplicado (MELAMED et al., 2009).

Embora seja uma prática bastante antiga no Japão e Europa, só recentemente o Brasil começou a conhecer mais sobre a aplicação de pó de rocha para a recuperação, remineralização e manutenção da fertilidade do solo. A fertilização do solo improdutivo gastando pouco, com a adição de pó de rocha, que muitas vezes é descartado em pedreiras e serrarias em todo o País, pode ser responsável por uma produção de qualidade e um solo rico em nutrientes por mais tempo. Podem ser citados como pesquisadores pioneiros da remineralização de solos o francês M. Missoux e o bioquímico nutricionista alemão Julius Hensel, que divulgaram, no século XIX, trabalhos sobre a utilização de rocha total como fonte de nutrientes. Hensel publicou, em 1880, um livro a que deu o sugestivo título de "Pão das Rochas", isto é, proveniente das rochas (LAPIDO-LOUREIRO & NASCIMENTO, 2009).

Devido à evolução desse tipo de técnica, foi estabelecida uma legislação que regulamenta a utilização desses tipos de materiais na agricultura, a Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016 do Ministério da Agricultura Pecuária Abastecimento (BRASIL, 2016). Apesar dessa regulamentação, a posição oficial da Embrapa é de que no momento “não há informação científica suficiente para se recomendar agrominerais silicáticos (remineralizadores) como fonte de nutrientes, sobretudo, de potássio, ou condicionadores de solos para a agricultura”. Contudo, a Embrapa está se organizando de forma coletiva, multidisciplinar e institucional para fornecer posição científica sobre o uso de agrominerais silicáticos na agricultura brasileira, por meio da execução de um projeto em rede, que visa a validação agrônômica de produtos comerciais e potenciais remineralizadores de solos, segundo a legislação brasileira vigente. Estes estudos serão direcionados de forma clara e objetiva para fornecer evidência técnica que embase ou não a aplicabilidade desses materiais na agricultura (STRALIOTTO et al., 2022).

Neste contexto, a oferta de crédito em vista das incertezas climáticas, a redução da dependência internacional para esses insumos e o aumento da eficiência no uso dos fertilizantes serão fundamentais. Este último fator depende fortemente de investimentos em tecnologias, novos produtos e processos mais eficientes para produção e aproveitamento dos fertilizantes pelas plantas (STRALIOTTO et al., 2022). Nesse sentido, a geração de informações científicas é de imensurável importância para o entendimento do potencial e das limitações da utilização das diferentes rochas como possíveis fontes alternativas de nutrientes. Por se tratar de um assunto ainda com limitação de informações científicas, e uma imensa disponibilidade de rochas para essa finalidade, mais pesquisas são necessárias para o entendimento das características das diferentes rochas visando a correta utilização desses produtos.

2.5. Minerais portadores de potássio

Existem numerosos minerais portadores de potássio, os quais, em sua grande maioria, apresentam significativa presença do elemento em suas redes cristalinas. Apenas uma minoria destes minerais é constituída por cloretos e, ou, sulfetos, sendo eles os de maior interesse econômico, devido à sua fácil solubilização. Neste grupo de minerais, a silvita (KCl) e a carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) são largamente processados como minerais de potássio. Outros minerais explorados em menor quantidade são langbeinita ($\text{KMg}_2(\text{SO}_4)_3$), polihalita ($\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a kainita ($4\text{KCl} \cdot 4\text{MgSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) (NASCIMENTO & LAPIDO-LOUREIRO, 2004). Além desses minerais, os minerais do grupo dos feldspatos são os mais abundantes minerais da crosta terrestre (mais de 60%) (LIRA & NEVES, 2013).

O Brasil apresenta uma grande diversidade de rochas silicatadas, que possivelmente podem ser utilizadas como fontes de K na forma moída. Essas rochas se desgastam muito lentamente em sua forma agregada (RESENDE et al., 2006). No entanto, quando aplicados em solos ricos em matéria orgânica, alta atividade biológica e grandes populações faunísticas edáficas, esses minerais rochosos podem se decompor relativamente rápido, com nutrientes como o K, tornando-se mais disponíveis às plantas (ALMEIDA, 2017). Além disso, a mineralogia é um dos fatores mais importantes na seleção desses materiais. Minerais contendo feldspatos alcalinos e feldspatoides, por exemplo, são considerados potenciais fontes de K para a fabricação de fertilizantes a serem aplicados diretamente no solo, como é o caso da rocha fonolítica de K-silicato alcalino (MANNING, 2018).

Os feldspatoides como a leucita (mineral pouco abundante) e outros silicatos, como, por exemplo, as micas, pelos seus teores, poderão ser fontes potenciais de potássio para a agricultura (NASCIMENTO & LAPIDO-LOUREIRO, 2009). Os feldspatos têm a cinética de dissolução mais intensamente estudada dentre os minerais de silicato. Isso ocorre em parte porque eles são os minerais de silicato mais abundantes nas rochas crustais e porque têm uma química e estrutura bem restritas, tornando-os passíveis de estudos experimentais (BLUM & STILLINGS, 1995).

Na tabela 2 são apresentados a composição química e solubilidade relativa de minerais portadores de potássio (adaptado de MANNING, 2010 e HENDRICKS & ROSS, 1941) de rochas com potencial de utilização como fontes alternativas de potássio.

Tabela 2. Composição química e solubilidade em água pura para minerais comuns portadores de potássio.

Mineral	Família mineral	Fórmula química	% de K ₂ O	Solubilidade relativa
Feldspato potássico	Feldspato	KAlSi ₃ O ₈	16	Muita baixa
Leucita	Feldspatoide	KAlSi ₂ O ₆	21	Média
Nefelina	Feldspatoide	(K, Na)AlSiO ₄	15	Média
Muscovita	Mica	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	10	Muito baixa
Biotita	Mica	K ₂ Fe ₆ Si ₆ Al ₂ O ₂₀ (OH) ₄	9	Baixa
Flogopita	Mica	K ₂ Mg ₆ Si ₆ Al ₂ O ₂₀ (OH) ₄	11	Baixa
Glauconita	Mica	(K, Ca, Na)(Mg, Fe ²⁺)(Fe ³⁺ , Al)(Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	1-6	Média

2.6. Dissolução dos minerais portadores de potássio

O intemperismo é um processo no qual a água, o ar e os organismos interagem com rochas e minerais expostos ao ambiente, alterando suas estruturas físicas e composições químicas (BÜDEL et al., 2004), promovendo a liberação dos nutrientes para a solução do solo, por meio dos seus processos, ocorrendo ao longo do tempo a liberação gradual do K estrutural para formas disponíveis às plantas (FARIA et al., 2012). Esses processos produzem materiais que apresentam pouca semelhança com as rochas originais (MARTINS et al., 2004).

Muitos minerais geológicos contêm K abundante, mas sua solubilidade é geralmente muito baixa para uso agrônômico (MIKKELSEN & ROBERTS, 2021). A ideia de usar rochas de silicato de alto teor de K para fertilizantes tem sido explorada por muitos anos (CICERI et al., 2015), mas a maioria das técnicas propostas requerem energia significativa ou insumos químicos para realizar uma dissolução parcial ou completa da rocha. Com base nas taxas de dissolução de fontes minerais de K, rochas contendo nefelina (incluindo nefelina, sienitos, fonolitos e traquitos) podem ter o maior potencial comercial como fontes agrícolas de potássio (MANNING, 2010).

A liberação de K não trocável de minerais do solo requer baixa concentração de K na solução do solo, que pode ser induzida pela zona de depleção de K usualmente formada na região da rizosfera devido à absorção vegetal. A liberação de K não trocável induzida pelas raízes pode contribuir com mais de 80% da absorção das plantas, mesmo em solos onde se presumia que essa

liberação fosse negligenciada, quando considerada a concentração de K na solução do solo fora da rizosfera (HINSINGER, 1998), sendo que a disponibilidade do K não-trocável para as plantas aumenta de acordo com as reações de troca e a dissolução mineral na rizosfera (FAGERIA et al., 2009).

As raízes não somente absorvem água e nutrientes para suportar o crescimento e desenvolvimento das plantas, mas também liberam compostos orgânicos e inorgânicos na rizosfera. Esses compostos causam mudanças químicas no ambiente das raízes, alterando a população microbiana e a disponibilidade de nutrientes (FAGERIA et al., 2009).

Os ácidos orgânicos liberados pelas raízes, compostos de baixo peso molecular que apresentam um ou mais grupos carboxílicos, estão associados a vários processos como mobilização e adsorção de nutrientes, desintoxicação de efeitos causados por metais, proliferação microbiana na rizosfera e dissolução de minerais do solo (JONES, 1998). Vários ânions orgânicos (citrato, oxalato, malato), liberados como exsudatos radiculares e fitossideróforos ou secreções de simbiontes micorrízicos (ácido urônico, peptídeos e aminoácidos), foram relatados como afetando diretamente a dissolução de minerais no solo (HINSINGER et al., 2001; MANNING, 2013; POKROVSKY & SCHOTT, 2000; EPIHOV et al., 2017).

Esses microrganismos destroem rochas de quatro maneiras, à medida que se desenvolvem na superfície sob certas condições: (i) Ácidos orgânicos liberados pelo metabolismo microbiano e células mortas de microrganismos, por exemplo, ácido oxálico, interagem com substratos e promovem intemperismo químico; (ii) Agentes quelantes são liberados, que quelam certos cátions metálicos, por exemplo, cálcio, dos substratos de rocha para sustentar o crescimento e a atividade microbiana, resultando na perda de cátions metálicos; (iii) Fósforo e outros elementos nutrientes são obtidos das substâncias rochosas, afrouxando a estrutura rochosa; e, (iv) Alguns substratos siliciosos são alcalinizados pelo mecanismo microbiano de concentração de CO₂ (CCM), resultando na dissolução do mineral silicato, que é uma nova hipótese de biointemperismo (CHEN et al., 2021).

Além dessas quatro vias, polímeros extracelulares e hifas fúngicas aderem e penetram na rocha, resultando no desmoronamento da rocha. O intemperismo biológico é exemplificado por esses exemplos. No entanto, é uma tarefa difícil identificar as interações microbianas internas em biofilmes; assim, mais pesquisas devem se concentrar nos mecanismos internos (CHEN et al., 2021).

No caso da intemperização dos feldspatos, Kämpf et al. (2009) indicam que os produtos desse processo podem ser a montmorilonita em climas semiáridos e bacias mal drenadas sob clima tropical e a caulinita, a haloisita, e até a gibbsita em condições de boa drenagem e fluxo intenso.

A intemperização química é a alteração de um mineral primário (feldspato microclínio) em mineral secundário (caulinita), exemplificada pela reação abaixo:



em que a solução ataca (solução do solo) é ácida, pois contém excesso de prótons (H^+) provenientes de diversas fontes (H_2CO_3 , ácidos orgânicos), os quais promovem a dissolução do feldspato. Nessa reação, parte dos componentes dissolvidos organiza-se na formação de um mineral secundário, e o excedente (H_4SiO_4 e K^+) são removidos. O tipo e o grau de desintegração de um mineral são controlados pela composição da solução do solo e a sua interação com o ambiente circundante. Segundo essa concepção, o solo é considerado um sistema aberto que continuamente troca matéria e energia com a circunvizinhança. Numa condição de ambiente isolado (sistema fechado), as reações não progredem, visto que a solução se torna saturada com os íons dissolvidos, e isso interrompe o processo de alteração graças ao equilíbrio químico alcançado (KÄMPF et al., 2009).

A rizosfera, conhecida como zona estreita do solo ao redor da raiz e contendo microrganismos ricos, apresenta alta atividade metabólica e é um ambiente importante para o crescimento das plantas (BAKKER et al., 2013; TURNBULL et al., 2014). Esta área é uma interface crítica que suporta as interações entre plantas e o ambiente associado ao solo (PEIFFER et al., 2013). Dentro dessas interações, o microbioma da rizosfera oferece uma gama de serviços ecossistêmicos para a planta, incluindo aquisição de nutrientes, tolerância ao estresse abiótico e proteção contra doenças (MENDES et al., 2013; VAN DER VOORT et al., 2016).

A comunidade microbiana da rizosfera é influenciada por ambos, solos e raízes de plantas (PHILIPPOT et al., 2013; SMALLA et al., 2001). As raízes das plantas liberam uma ampla variedade de compostos químicos para atrair e selecionar microrganismos na rizosfera (BAETZ & MARTINOIA, 2014; BAKKER et al., 2013). Os microrganismos colonizam todos os componentes da planta, e as plantas interagem constantemente com esse complexo microbioma. Entre 5 e 20% do rendimento fotossintético de uma planta é transferido para seu microbioma, e isso ocorre principalmente através das raízes. Como resultado dessa transferência, a rizosfera suporta abundância e atividade bacteriana muito mais altas, não apenas quando comparadas com outros compartimentos de plantas, mas também em relação ao solo (KOWALCHUK et al., 2002; SMALLA et al., 2001)

As plantas respondem à deficiência de nutrientes alterando a morfologia das raízes, recrutando a ajuda de microrganismos e alterando o ambiente químico da rizosfera. Componentes

dos exsudatos radiculares auxiliam as plantas no acesso aos nutrientes, acidificando ou alterando as condições redox dentro da rizosfera ou quelando diretamente com o nutriente. Os exsudatos podem liberar nutrientes via dissolução de fases minerais insolúveis ou dessorção de minerais argilosos ou matéria orgânica, podendo esses nutrientes ser liberados na solução do solo e, então, ser absorvidos pela planta (MCNEAR, 2013).

Em seu ambiente natural, as plantas fazem parte de um rico ecossistema que inclui numerosos e diversos microrganismos no solo. Há muito se reconhece que alguns desses micróbios, como fungos micorrízicos ou bactérias simbióticas fixadoras de nitrogênio, desempenham papéis importantes no desempenho das plantas, melhorando a nutrição mineral. No entanto, a gama completa de micróbios associados às plantas e seu potencial para substituir insumos agrícolas sintéticos só recentemente começaram a ser descobertos. Nos últimos anos, houve um grande avanço no conhecimento da composição dos microbiomas rizosféricos e sua dinâmica (JACOKY et al., 2017).

A chave para entender a capacidade das rochas silicatadas de fornecer K é sua estabilidade nos solos. Se um solo já contém um mineral de silicato específico, como K-feldspato, é improvável que a adição de mais K-feldspato aumente a quantidade de K na solução do solo, pois isso será controlado pela reação de intemperismo que controla a dissolução do feldspato. Se o feldspato for adicionado a um solo no qual o mineral está ausente porque foi removido por processos naturais de intemperismo, o feldspato adicionado também irá intemperizar, liberando K (BROUDER et al., 2021; MANNING, 2018).

O fertilizante convencional fornecedor de potássio contém K solúvel em água e é a fonte ideal para uma ampla gama de solos, especialmente em regiões temperadas. Fontes alternativas de K são necessárias em circunstâncias em que a fonte convencional é inacessível – devido ao preço ou razões logísticas, incluindo custos de transporte. Os minerais de silicato de potássio têm o potencial de fornecer K para o crescimento das culturas, mas seu desempenho depende de suas taxas de dissolução, do ambiente do solo e da comunidade microbiana do solo. Assim, sua avaliação e desenvolvimento como *commodities* requerem experimentos de crescimento de plantas em solos específicos e, necessariamente, seu comércio é local (MANNING, 2018).

Rochas contendo minerais silicatos de K (como feldspato e nefelina) ocorrem amplamente como fontes potenciais de K para uso em solos onde esses minerais se decompõem rapidamente. A solubilização das rochas silicatadas portadoras de potássio, mediada pelas comunidades microbianas do solo, ocorre com rapidez suficiente para fornecer nutrientes ao crescimento das plantas (MANNING, 2018).

Evidências de todos os solos mostram que os minerais de silicato, incluindo os feldspatos, se dissolvem mais rapidamente do que o indicado em experimentos de laboratório (MANNING, 2018). As taxas de dissolução mineral têm sido repetidamente subestimadas por não levar em conta a influência de plantas superiores na cinética de intemperismo (BORMANN et al., 1998; HINSINGER et al., 2001). As plantas influenciam a condição biológica e física do solo, particularmente na rizosfera, onde as condições podem diferir muito daquelas do solo. Temperatura, pH, níveis de umidade, concentrações elementares e gasosas flutuam nestas esferas e assim alteram a velocidade e quase-equilíbrio das reações entre a fase mineral sólida e a solução do solo (HARLEY & GILKES, 2000; MARSCHNER, 2002).

Os microrganismos são os motores invisíveis da fertilidade do solo e o crescimento das plantas depende de um conjunto de funções realizada por microrganismos que habitam o solo e as raízes. Por exemplo, bactérias e fungos mineralizam nutrientes do solo, disponibilizando-os para as plantas (BERENDSEN et al., 2012; FIERER et al., 2017).

2.7. Rochas portadoras de potássio do planalto de Poços de Caldas-MG

O planalto de Poços de Caldas é a região do Brasil que apresenta os trabalhos mais abrangentes na literatura brasileira, no campo da geologia, devido às suas peculiaridades, tanto mineralógicas e petrográficas quanto sua gama de recursos minerais (HIRATA, 2009). Os primeiros estudos da geologia do maciço de Poços de Caldas tiveram início com Derby (1887), sendo esse autor o primeiro a anunciar a presença de rochas alcalinas no planalto e reconhecendo assim a natureza vulcânica do local.

O maciço de Poços de Caldas é uma das maiores ocorrências de rochas alcalinas do mundo (BJÖRNBERG, 1959), rochas ricas em potássio e, ou, sódio (DALY, 1910), ocupando cerca de 800 quilômetros quadrados (ELLERT, 1959), sendo superada pelos maciços da Península de Kola, na Rússia, com 1.300 quilômetros quadrados (ESISEEV et al., 1937) e do Itatiaia, no Brasil, com 1.200 quilômetros quadrados (LAMEGO, 1936), e sendo comparável aos jazimentos de Pilansberg, no Transvaal, localizada na África do Sul (SHAND, 1929) e de Illimaussak, na Groenlândia (USSING, 1911).

Para a agricultura, o maciço de Poços de Caldas representa grande potencial como fornecedor do nutriente potássio. As rochas de maior potencial de utilização em natura para uso na agricultura, são as rochas efusivas, sendo elas o fonolito e a rocha potássica/fonolito hidrotermalizado.

O fonolito, juntamente com o tinguaió, são rochas com maior representatividade no planalto de Poços de Caldas, sendo encontradas em dois terços da área do maciço de Poços de Caldas, e apresentando cerca de 8% de K_2O e 7% de Na_2O . A rocha potássica/fonolito hidrotermalizado é um material que sofreu intensas alterações hidrotermais, com profunda alteração dos minerais constituintes e da composição química (CPRM, 1978). Nesse processo, há uma lixiviação da Na, com enriquecimento de potássio, dando origem a rochas com teores de 10 a 14% de K_2O , tendo como composição mineralógica abundante o microclínio, quase 75% da rocha (NEUMANN, 2002). A reserva geológica chega a 3,2 bilhões de toneladas de rocha potássica (VALARELLI & GUARDANI, 1981), ou seja, 350 Mt de K_2O . Os primeiros estudos visando a utilização de rochas do planalto de Poços de Caldas como possíveis fontes de potássio, tiveram início na cultura da batata-inglesa (BOOK et al., 1960), algodão (NEVES et al., 1960) e arroz (CATANI & GALLO, 1960), utilizando a rocha leucita. Os resultados desses trabalhos não mostraram resultados satisfatórios em comparação ao KCl. Posteriormente, foram realizados trabalhos com outras rochas do planalto, o fonolito, como fonte alternativa de potássio na cultura da cana-de-açúcar (LUZ et al., 2013; DUARTE et al., 2013), soja, milho, feijão e arroz (SORATTO et al., 2021a; SORATTO et al., 2021b), eucalipto (MORAES NETO & MARTINS, 2020; TOLEDO et al., 2020) e cafeeiro (MANCUSO et al., 2014), apresentando resultados com respostas equivalentes às aquelas proporcionadas pelo uso do KCl.

As rochas do planalto de Poços de Caldas apresentam grande potencial de utilização como fonte alternativa de potássio, mas seu uso encontra grande dependência na geração de informações científicas para o entendimento do potencial de utilização nos diferentes solos, climas, culturas e sistemas de produção brasileiros.

3. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. R. Petrographic analysis, geophysical and geobotanical prospecting: Agroecological potential in the central portion of the state of Tocantins. In: BAMBERG, A. L.; SILVEIRA, C. A. P.; MARTINS, E. S.; BERGMANN, M.; MARTINAZZO, R.; THEODORO, S. H. (Eds.). **Anais...** Congresso Brasileiro de Rochagem, Proceedings of the III Brazilian Congress of Rochagem, Pelotas, Brazil, 8–11 November 2016; Triunfal Gráfica e Editora: Assis, Brazil, 2017; Volume 3, p. 129–133.

ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Pesquisa setorial, macro indicadores.** http://anda.org.br/pesquisa_setorial/, acesso em: 29 mai.2022

BAETZ, U.; MARTINOIA, E. Root exudates: the hidden part of plant defense. **Trends Plant Sci.** v.19, n 2, p. 90-98, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.11.006>.

BAKKER, P. A.; BERENDSEN, R. L.; DOORNBOS, R. F.; WINTERMANS, P. C.; PIETERSE, C. M. The rhizosphere revisited: root microbiomics. **Frontiers in plant science**, v. 4, p. 165, 2013. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00165>.

BENNETT, P. C.; CHOI, W. J.; ROGERA, J. R. Microbial destruction of feldspars. **Miner Manage** v.8, n 62A, p. 149-150, 1998.

BERENDSEN, R. L.; PIETERSE, C. M.; BAKKER, P. A.; The rhizosphere microbiome and plant health. **Trends Plant Sci.** v.17, n 8, p. 478-86, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>.

BLUM, A. E.; STILLINGS, L. L. **Feldspar dissolution kinetics**. In: **WHITE, A. F.; BRANTLEY, S. L. (eds.). Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals**. p. 291–352, 1995. <https://doi.org/10.1515/9781501509650-009>.

BOOK, O. J.; CATANI, R. A.; FREIRE, E. S. Adubação da batatinha: experiências com leucita, sulfato e cloreto de potássio. **Bragantia**, v. 19, n 51, p. 811-828, 1960.

BORMANN, B. T.; WANG, D.; SNYDER, M. C.; BORMANN, F. H.; BENOIT, G.; APRIL, R. Rapid, plant-induced weathering in an aggrading experimental ecosystem. **Biogeochemistry**, v. 43, n 2, p. 129-155, 1998. <https://doi.org/10.1023/A:1006065620344>.

BRASIL, Estudo: **Produção Nacional de Fertilizantes**. 26 p., 2020. <https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/estudos-estrategicos-2/estudo-producao-nacional-fertilizantes>, acesso em: 04 mai. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anexo 1 da Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed. 154, seção 1, p. 19, 10 ago. 2018. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/anexo-i-in-39-2018-inclui-rocha-silicatica-kamafugito-03-03-22.pdf/view>, acesso em: 29 mai. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 5, de 10 de março de 2016**, diário oficial da união Publicado, Brasília, DF, ed. 49, seção 1, p. 10 https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/doi-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106 acesso em: 29 mai. 2022.

BROUDER, S. M.; VOLENEC, J. J.; MURRELL, T. S. **The Potassium Cycle and Its Relationship to Recommendation Development**. In: MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M. L. (eds) **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops**. Springer, Cham., p. 1–46, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_1

BÜDEL, B.; WEBER, B.; KUHL, M.; PFANZ, H.; SULTEMEYER, D.; WESSELS, D.; Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes. **Geobiology**. v. 2, n 4, p. 261–268, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4677.2004.00040.x>

CAKMAK, I. The Role of Potassium in Alleviating Detrimental Effects of Abiotic Stresses in Plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 168, n 4, p. 521-530, 2005. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200420485>.

CATANI, R. A.; GALLO, J. R. A disponibilidade do potássio da "Leucita de Poços de Caldas", estudada por meio do arroz. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, v. 17, p. 30-35, 1960.

CHEN, X.; BAI, F.; HUANG, J.; LU, Y.; WU, Y.; YU, J.; BAI, S. The Organisms on Rock Cultural Heritages: Growth and Weathering. **Geoheritage**. v. 13, n 3, 17 p. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00588-2>.

CICERI, D.; MANNING, D. A.; ALLANORE, A. Historical and technical developments of potassium resources. **Science of the total environment**. v. 502, p. 590-601, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.013>.

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Relatório anual 1977**. Salvador: 1978. <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14101>>, acesso em 28/05/2022.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries Históricas de Área Plantada, Produtividade e Produção**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>, acesso em: 10/05/2022.

CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. **Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil**. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p.71-92, 2005.

DALY, A. Origin of the alkaline rocks. **Geological Society of America Bulletin**. v. 21, n. 1, p. 87-118, 1910. <https://doi.org/10.1130/GSAB-21-87>.

DERBY, O. A. On nepheline rocks in Brazil, with special reference to the association of phonolite and foyaite, **Quart. Jour. Geol. Soc.**, v. 43, p. 457-473, 1887.

DREYER, I.; GOMEZ-PORRAS, J. L.; RIEDELSBERGER, J. The potassium battery: a mobile energy source for transport processes in plant vascular tissues. **New Phytologist**, v. 216, n 4, p. 1049–1053, 2017. <https://doi.org/10.1111/nph.14667>.

DUARTE, I. N.; KORNDÖRFER, G. H.; SANTOS, D. S. Rochagem com o fonolito para cana planta. In: II Congresso Brasileiro de Rochagem, 2013, Poços de Caldas (MG). **Anais... Poços de Caldas (MG)**, p. 292-300, 2013.

ECHER, F. R.; FOLONI, J. S. S.; CRESTE, J. E. Fontes de potássio na adubação de cobertura do algodoeiro I – Produtividade, qualidade de fibras e análise econômica. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, p. 1135- 1144, 2009.

ELISEEV, N. A.; OGINSKY, J. S.; VOLODIN, E. N. **Geological and Petrographical description of the Khibine Tundras**, Int. Geol. Congress, XVI Session, pp. 51-85, 1937.

ELLERT, R. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Boletim Da Faculdade De Filosofia Ciências E Letras, Universidade De São Paulo. Geologia**, n. 18, p. 5-60, 1959. <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3862.bffcluspgeologia.1959.121851>

EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 212 p.

EPIHOV, D. Z.; BATTERMAN, S. A.; HEDIN, L. O.; LEAKE, J. R.; SMITH, L. M.; BEERLING, D. J. N₂-fixing tropical legume evolution: a contributor to enhanced weathering through the Cenozoic? **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 284, n. 1860, 20170370, 2017. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0370>.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas**. trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina: Editora Planta Título Original: Mineral Nutrition of Plants / Emanuel Epstein e Arnold J. Bloom. – Sunderland: Sinauer Associates, 2004.

FAGERIA, N. K.; ARAUJO, A. P.; STONE, L. F. **Mudanças químicas na rizosfera**. In: MELO, V.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.) **Química e Mineralogia do Solo: Parte II - Aplicações**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.161-186.

FARIA A. F.; ALVAREZ V. V. H.; MATTIELLO, E. M.; LIMA NEVES, J. C.; FELIX DE BARROS, N.; NOGUEIRA DE PAIVA H. Capacidade de suprimento de potássio em solos de Minas Gerais-Brasil. **Spanish Journal of Soil Science**, v. 2, i. 1, p. 26-37, 2012. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2012.V2.N1.02>.

FIERER, N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. **Nat Rev Microbiol**, v. 15, p. 579–590, 2017. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>.

GE, J. J.; WU, R.; SHI, X. H.; YU, H.; WANG, M.; LI, W. J. Biodegradable polyurethane materials from bark and starch. II. Coating materials for controlled-release fertilizer. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 86, n. 12, p. 2948-2952, 2002. <https://doi.org/10.1002/app.11211>.

GRANADA, C. E.; LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K. Editorial: Rocks, Plants and Microbes. *Front. Plant Sci.* v. 12, n. 745338, 2 p., 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.745338>.

HARLEY, A., GILKES, R. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, n. 56, p. 11–36, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>.

HENDRICKS, S. B.; ROSS, C. S. Chemical composition and genesis of glauconite and celadonite. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, v. 26, n. 12, p. 683-708, 1941.

HINSINGER, P. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Adv. Agron.* v. 64, p. 225–265, 1998. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.041>.

HINSINGER, P.; BELL, M. J.; KOVAR, J. L.; WHITE, P. J. **Rhizosphere Processes and Root Traits Determining the Acquisition of Soil Potassium.** In: MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M. L. (eds.) **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops.** Springer, Cham. p. 99-117, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_4.

HINSINGER, P.; FERNANDES BARROS, O.N.; BENEDETTI, M.F.; NOACK, Y.; CALLOT, G. Plant-induced weathering of a basaltic rock experimental evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 65, p. 137-152, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00524-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00524-X).

HIRATA, M. T. **Caracterização geotécnica com base na compartimentação fisiográfica: aplicação em Poços de Caldas - MG.** 2009. 65 f. Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/119421>>.

JACOBY, R.; PEUKERT, M.; SUCCURRO, A.; KOPRIVOVA, A.; KOPRIVA, S. The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition—Current Knowledge and Future Directions. *Front. Plant Sci.* v. 8, n. 1617, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>.

JAMES, A. E.; SOJKA, R. E. Matrix based fertilizers reduce nitrogen and phosphorus leaching in three soils, **Journal of Environmental Management**. v. 87, n. 3, p. 364-372, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.044>.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. **Plant and Soil**. v. 205, p. 25-44, 1998. <https://doi.org/10.1023/A:1004356007312>.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. **Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo**. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo - Parte I: Conceitos básicos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais. 2009. p. 333-380.

KOWALCHUK, G. A.; BUMA, D. S.; DE BOER, W.; ET AL. Effects of above-ground plant species composition and diversity on the diversity of soil-borne microorganisms. **Antonie Van Leeuwenhoek**, v. 81, n. 509, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1020565523615>.

LAMEGO, A. R. **O maciço do Itatiaia e regiões circundantes**. Dep. Nac. Prod. Min., Serv Geol. Min., Bol. n. 88, 93 p. Rio de Janeiro, 1936.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; NASCIMENTO, M. **Fertilização natural: rochagem, agricultura orgânica e plantio. Breve síntese conceitual**. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (eds.) **Fertilizantes agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

LI, T.; WANG, H.; WANG, J.; ZHOU, Z.; ZHOU, J. Exploring the potential of phyllosilicate minerals as potassium fertilizers using sodium tetraphenylboron and intensive cropping with perennial ryegrass. **Scientific Reports**, 5, 9249, p. 1-7, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep09249>.

LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.8.3, p. 110 –117. 2013.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. L.; MELAMED., R. G.; FIGUEIREDO NETO, J. (eds.) Fertilizantes agroindústria e sustentabilidade.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 33-79.

LUZ, P. H. DE C., PERES, C. E. B., YASUDA, M., FERRAZ, M. R., CASADEI, R. A.; LUNARDI, L. J. Avaliação do desempenho do fonolito via mineral e no enriquecimento da torta de filtro em soqueira de cana-de-açúcar. 2013. In **Anais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 2006. 638 p.

MANCUSO, M. A. C. SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A. Effect of potassium sources and rates on Arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1448–1456, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>.

MANNING, D. A. C. Innovation in Resourcing Geological Materials as Crop Nutrients. **Natural Resources Research**. v. 27, p. 217–227, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9347-2>

MANNING, D. A. C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. **Agron. Sustain.** v. 30, p. 281–294, 2010. <https://doi.org/10.1051/agro/2009023>.

MANNING, D. A. C.; RENFORTH, P. Passive sequestration of atmospheric CO₂ through coupled plant—Mineral reactions in urban soils. **Environ. Sci. Technol.** v. 47, p. 135–141, 2013. <https://doi.org/10.1021/es301250j>.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** London: Academic, 2002. 889p.

MARTINS, J. C.; MARTINS, E. de S.; REATTO, A. **Revisão de intemperismo de micas.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 48 p.

McNear Jr., D. H. The Rhizosphere - Roots, Soil and Everything In Between. **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 3, 1 p., 2013.

MELAMED, R.; GASPAR, J. C.; MIEKELEY, N. **Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais.** In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Eds.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 385-395.

MENDES, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, n. 5, p. 634–663, 2013. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>.

MIKKELSEN, R. L.; ROBERTS, T. L. **Inputs: Potassium sources for agricultural systems.** In: MURREL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; OCHIAI, R.; ET AL. 9 of 10 Norton, & M. L. Thompson (Eds.). **Improving potassium recommendations for agricultural crops.** Springer, p. 47–74, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_2

MORAES NETO, S. P. de.; MARTINS, E. de S. Comparação entre adubação com cloreto de potássio e dois tipos de rochas potássicas no crescimento de *Eucalyptus urophylla*. **Agropecuária Técnica**, p. 83-91, 2020. <https://doi.org/10.25066/agrotec.v41i3-4.50775>

NACHILUK, K. **Alta na Produção e Exportações de Açúcar Marcam a Safra 2020/21 de Cana.** **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 16, n. 6, p. 1-5, 2021. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925>. Acesso em: 09.abr.2022.

NASCIMENTO, M.; LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V. **O potássio na agricultura brasileira: fontes e rotas alternativas.** In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Eds.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 305-335.

NEUMANN, R. **Caracterização Mineralógica e Tecnológica da Rocha Potássica do Estéril da Mina Osami Utsumi, Caldas (MG), Como Subsídio à Extração do Potássio, Projeto Fontes Alternativas de Potássio para Fertilizantes.** CETEM-CTM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

NEVES, O. S.; CAVALERA, P. A.; ABRAMIDES, E.; FREIRE, E. S. Adubação do algodoeiro. X - Ensaio com diversos adubos potássicos. **Bragantia**, v. 19, n 12, p. 183 - 200, 1960.

NI, B. L.; LIU, M. Z.; LÜ, S. Y. Multifunctional slow-release urea fertilizer from ethylcellulose and superabsorbent coated formulations. **Chemical Engineering Journal**, Nova York, v. 155, n. 3, p. 892- 898, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.08.025>.

OSAKI, M. **Conflito no leste europeu completa um mês e setor de fertilizantes segue apreensivo**. CEPEA, USP. 2022. <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniaocpea/conflito-no-leste-europeu-completa-um-mes-e-setor-de-fertilizantes-segue-apreensivo.aspx>, <acesso em 04 de maio de 2022>.

PEIFFER, J.A.; SPOR, A.; KOREN, O.; JIN, Z.; TRINGE, S. G.; DANGL, J.L.; BUCKLER, E. S.; LEY, R. E. Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. v. 110, n. 16 p. 6548-6553, 2013 <https://doi.org/10.1073/pnas.1302837110>.

PHILIPPOT, L.; SPOR, A.; HÉNAULT, C.; et al. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. **The ISME Journal**. v. 7, p. 1609–1619, 2013. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.34>.

POKROVSKY, O. S.; SCHOTT, J. Kinetics and mechanism of forsterite dissolution at 25°C and pH from 1 to 12. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 64, n. 19, p. 3313-3325, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00434-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00434-8)

RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RESENDE, A. V. de; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, E. de S.; SENA, M. C. de.; NASCIMENTO, M. T. do.; SILVA, L. de C. R.; LINHARES, N. W. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Revista Espaço & Geografia**, v. 9, n. 1, p. 135-161. 2006.

RESENDE, A. V.; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, E. S.; NASCIMENTO, M. T.; SOBRINHO, D. A. S.; FALEIRO, A. S. G.; LINHARES, N. W.; SOUZA, A. L. E CORAZZA, E. J. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: I. Respostas da soja e do

milheto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30. Recife, 2005. **Anais...** Recife: UFRPE/SBCS. (CD-rom), 2005.

ROSSA, U. B. Fertilizante de liberação lenta no desenvolvimento de mudas de Paricá. **Revista da Madeira**, Brasília, n. 115, 2008. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509820582>

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; BIANCHET, P.; VARGAS, V. P.; PICOLI, G. J. Efeito de doses de cloreto de potássio sobre a germinação e o crescimento inicial do milho, em solos com texturas contrastantes. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8 n2, p. 187-197, 2009.

SHAND, S. J. The geology of Pilansberg in the Western Transvaal: A study of alkaline rocks and ring-intrusions. **Trans. Geol. Soc. South Africa**, v. J, n. 1, p. 97-156, 1929.

SHAVIT, V.; REISS, M.; SHAVIV, A. Wetting mechanisms of gel-based controlled-release fertilizers. **Journal of Controlled Release**, Nottingham, v. 88, n. 1, p. 71-83, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(02\)00455-8](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(02)00455-8).

SMALLA, K.; WIELAND, G.; BUCHNER, A.; ZOCK, A.; PARZY, J.; KAISER, S.; ROSKOT, N.; HEUER, H.; BERG, B. Bulk and Rhizosphere Soil Bacterial Communities Studied by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis: Plant-Dependent Enrichment and Seasonal Shifts Revealed. **Applied and environmental microbiology**, v. 67, n. 10, p. 4742-4751, 2001. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.10.4742-4751.2001>.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; COSTA, C. H. M. da; GILABEL, A. P.; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Silicate rocks as an alternative potassium fertilizer for upland rice and common bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, n. e01411, 10 p., 2021a. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01411>.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; GILABEL, A. P.; COSTA, C. H. M. da; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Efficiency and residual effect of alternative potassium sources in grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, n. e02686, 10 p., 2021b. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02686>.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A. **Manejo da fertilidade do solo para culturas anuais: experiências no cerrado. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 2009. 28 p.** (EMBRAPA-CPAC. Informações Agronômicas, 126).

STRALIOTTO, R.; TEIXEIRA, P. C.; POLIDORO, J. C.; BENITES, V. M. **Crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais. In: TORRES, L. A.; CAMPOS, S. K. (eds.) Megatendências da Ciência do Solo 2030. Brasília, DF: Embrapa, p. 73-83. 2022.**

TOLEDO, F. H. S. F.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; MARIÑO, Y. A.; Biomassa aérea, transpiração e eficiência do uso da água em plantações de eucalipto fertilizadas com KCl, NaCl e pó de rocha fonolítica. **New Forests**, v. 51, p. 469–488, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09743-8>

TURNBULL, M. S.; GEORGE, P. B. L. G.; LINDO, Z. Weighing in: Size spectra as a standard tool in soil community analyses. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 68, p. 366-372, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.019>

USSING, N. V. Geology of the country around Julianehaab, Greenland, **Med. Gronl.**, v. 38. 1911.
VALARELLI, J. V.; GUARDANI, R. Estudos experimentais para utilização das rochas potássicas de Poços de Caldas como fertilizantes. **Fertilizantes**, São Paulo, v. 3, n. 7, p. 4-7, 1981.

VAN DER VOORT, M.; KEMPENAAR, M.; VAN DRIEL, M.; RAAIJMAKERS, J. M.; AND MENDES, R. (2016). Impact of soil heat on reassembly of bacterial communities in the rhizosphere microbiome and plant disease suppression. **Ecology Letters**. v. 19, p. 375–382. <https://doi.org/10.1111/ele.12567>.

VALARELLI, J. V.; GUARDANI, R. Estudos experimentais para utilização das rochas potássicas de Poços de Caldas como fertilizantes. **Fertilizantes**, São Paulo, v.3, n.3, p. 4-7. 1981.

WU, L.; LIU, M. Preparation and properties of chitosan coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water retention. **Carbohydrate Polymers**, v.72, p.240-247, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.08.020>.

Wu, Q.; Zhou, W.; Chen, D.; CAI, A.; AO, J.; HUANG, Z. Optimizing soil and fertilizer phosphorus management according to the yield response and phosphorus use efficiency of sugarcane in southern China. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. v. 20 p. 1655–1664. 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00236-8>.

CAPÍTULO 2 – Fonolito de Poços de Caldas como fonte de potássio para cultivo de cana planta.

RESUMO

MONTES, RAFAEL MARANGONI. Fonolito de Poços de Caldas como fonte de potássio no plantio da cana-de-açúcar.

O interesse pela busca de fontes alternativas de nutrientes tem aumentado ano a ano, com maior interesse no passado recente, devido à oscilação dos preços dos fertilizantes como também a incerteza sobre a disponibilidade desses insumos. Devido à grande dependência de importação desses insumos, que chegou próximo de 85% no ano de 2021, faz-se necessário a implementação de estratégias para mitigar essa situação. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo investigar o potencial de utilização do fonolito de Poços de Caldas-MG, como fonte de potássio, no plantio da cultura da cana-de-açúcar. No município de Campo Florido-MG, foi instalado um experimento em cana planta em blocos inteiramente casualizados (DBC), variedade CTC 9002, em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico com baixa concentração de potássio, em esquema fatorial $3 \times 3 + 2$, avaliando 3 doses (60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O) e 3 fontes de potássio (fonolito, fonolito com cloreto de potássio (KCl) e KCl, mais um tratamento controle (sem K) e um tratamento com KCl no quebra-lombo (dose 120 kg ha⁻¹ de K₂O). Apesar de não terem sido observadas diferenças significativas, observa-se que o fonolito e o fonolito com KCl apresentaram resultados equivalentes ao KCl em relação as concentrações foliares de K, Na, Si, Cu, Fe, Mn, Zn, produtividade de colmos, açúcar total recuperável e produtividade de açúcar, tanto para cana planta como cana soca.

Palavras-chave: pó de rocha, remineralizador, fertilizante, agromineral

ABSTRACT

MONTES, RAFAEL MARANGONI. Phonolite from Poços de Caldas as a source of potassium in sugarcane planting.

Interest in the search for alternative sources of nutrients has increased year by year, with greater interest in the recent past, due to fluctuations in fertilizer prices as well as uncertainty about the availability of these inputs. Due to the high dependence on imports of these inputs, which reached close to 85% in 2021, it is necessary to implement strategies to mitigate this situation. In this sense, this work aims to investigate the potential use of phonolite from Poços de Caldas-MG, as a source of potassium, in the planting of sugarcane. In the municipality of Campo Florido-MG, an experiment was set up in sugarcane plants in completely randomized blocks (DBC), variety CTC 9002, in a Dystrophic Red-Yellow Latosol with low potassium concentration, in a 3 x 3 + 2 factorial scheme, evaluating 3 doses (60, 120 and 240 kg ha⁻¹ of K₂O) and 3 sources of potassium (phonolite, phonolite with potassium chloride (KCl) and KCl, plus a control treatment (without K) and a treatment with KCl in the breaker loin (dose 120 kg ha⁻¹ of K₂O). Although no significant differences were observed, it is observed that the phonolite and the phonolite with KCl presented results equivalent to KCl in relation to the foliar concentrations of K, Na, Si, Cu, Fe, Mn, Zn, culm productivity, total recoverable sugar and sugar productivity, both for plant cane and ratoon cane.

Keywords: rock dust, remineralizer, fertilizer, rock for crops

1. INTRODUÇÃO

Para um crescimento saudável, as plantas requerem uma variedade de nutrientes em maiores e menores quantidades. Com exceção do nitrogênio, a fonte final de todos os nutrientes é o conjunto mineral geológico que ocorre dentro de um solo (MANNING et al., 2017).

Historicamente, a produtividade agrícola brasileira tem mantido estreita e direta relação com a utilização de adubos. Ao longo das últimas cinco décadas, a produção das principais culturas vem aumentando, em paralelo com o crescimento no consumo de fertilizantes. (EMBRAPA, 2018a). No ano de 2021, o Brasil consumiu 45,8 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo a importação responsável por suprir 85% desse volume. Para os fertilizantes potássicos, a importação, quase totalmente representada pelo cloreto de potássio (KCl), foi responsável por 95% da demanda desse insumo (ANDA, 2022). Esse alto volume de importação de fertilizantes potássicos afeta negativamente a balança comercial brasileira e mostra a necessidade de negociação com um grupo restrito de países fornecedores, o que justifica que seja dada a devida importância à exploração de alternativas a este fertilizante (MANCUSO et al., 2014).

A avaliação de fontes alternativas de potássio para uso agrícola justifica-se como uma estratégia nacional de elevada relevância, devido ao aumento constante da produção agrícola e sua direta dependência da importação de fertilizantes potássicos. O potássio é o segundo elemento mais extraído pelas culturas, participando como ativador enzimático de diversas reações bioquímicas que ocorrem na planta, do metabolismo de carboidratos e dos mecanismos de abertura e fechamento dos estômatos (MALAVOLTA, 2006).

Uma técnica de fertilização natural denominada “rochas para cultivos” (do inglês “rock for crops”), que consiste na aplicação direta de rocha finamente moída ao solo (VAN STRAATEN, 2002), tem se mostrado uma opção alternativa para os fertilizantes importados. Como o Brasil apresenta uma grande diversidade geológica, essa técnica pode ajudar a reduzir as importações de KCl e, conseqüentemente, os custos de produção, otimizando a agricultura nacional.

A mineralogia é um dos fatores mais importantes na seleção desses materiais. Minerais contendo feldspatos alcalinos e feldspatoides, por exemplo, são considerados potenciais fontes de K para a fabricação de fertilizantes a serem aplicados diretamente no solo (MANNING, 2018), porém pouca atenção tem sido dada aos minerais filossilicatos portadores de K, e à relação entre a capacidade de liberação de K dos minerais filossilicatos contendo K sob cultivo e se sua liberação de K é suficiente para o suprimento da necessidade de K da planta (LI et al., 2015). Mesmo sabendo que há muito é reconhecido que há um certo equilíbrio entre as várias formas de potássio no solo, em diversas condições tem sido verificado que a quantidade de K extraída pelas plantas é superior

às formas trocáveis, sendo substancial a contribuição das formas não-trocáveis no total deste nutriente absorvido pelas plantas (CURI et al., 2005). Assim, a investigação de minerais e rochas portadoras de K que podem ser usados diretamente no solo como fonte alternativa de potássio é um passo importante a ser investigado (LI et al., 2015).

Além do potássio, as rochas alcalinas de K-silicato também podem fornecer silício (Si) para as plantas (MANCUSO et al., 2014; SORATTO et al., 2021a; SORATTO et al., 2021b). Embora o Si não seja considerado um nutriente para o crescimento das plantas, a deposição de Si como sílica amorfa na parede celular mantém as plantas mais eretas, além de causar efeitos estimulantes, aumentar a capacidade fotossintética, proteger e, ou, reduzir agentes bióticos e abióticos (GUNTZER et al., 2012; SAVVAS & NTATSI, 2015).

Dentre as diversas rochas portadoras de potássio disponíveis no território brasileiro, os fonolitos provenientes do planalto de Poços de Caldas-MG têm se mostrado uma opção com potencial para uso direto na agricultura, por serem rochas de origem ígnea e apresentarem em sua composição feldspatos e feldspatoides. Em condições de campo, o fonolito já foi testado como fonte de potássio nas culturas da cana-de-açúcar (LUZ et al., 2013; DUARTE et al., 2013), soja, milho, feijão e arroz (SORATTO et al., 2021a; SORATTO et al., 2021b), eucalipto (MORAES NETO & MARTINS, 2020; TOLEDO et al., 2020) e cafeeiro (MANCUSO et al., 2014), verificando-se resultados equivalentes àqueles obtidos com o uso do KCl.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da rocha fonolito e sua mistura com cloreto de potássio, na cultura da cana-de-açúcar, em comparação com a fonte tradicional KCl.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Um experimento de campo foi conduzido no município de Campo Florido, no Estado de Minas Gerais, Brasil (19°38'37.1"S, 48°29'05.0"W, na altitude de 784 m), em área de produção da Usina Santo Ângelo, anteriormente cultivado com pastagem do gênero braquiária, utilizando-se a cultura da cana-de-açúcar, variedade CTC 9002, ambiente de produção D, nas safras 2019/2020 e 2020/2021.

O clima predominante na região do experimento é Aw, de acordo com Köppen-Geiger. Os dados climáticos registrados durante o experimento são mostrados na Figura 1.

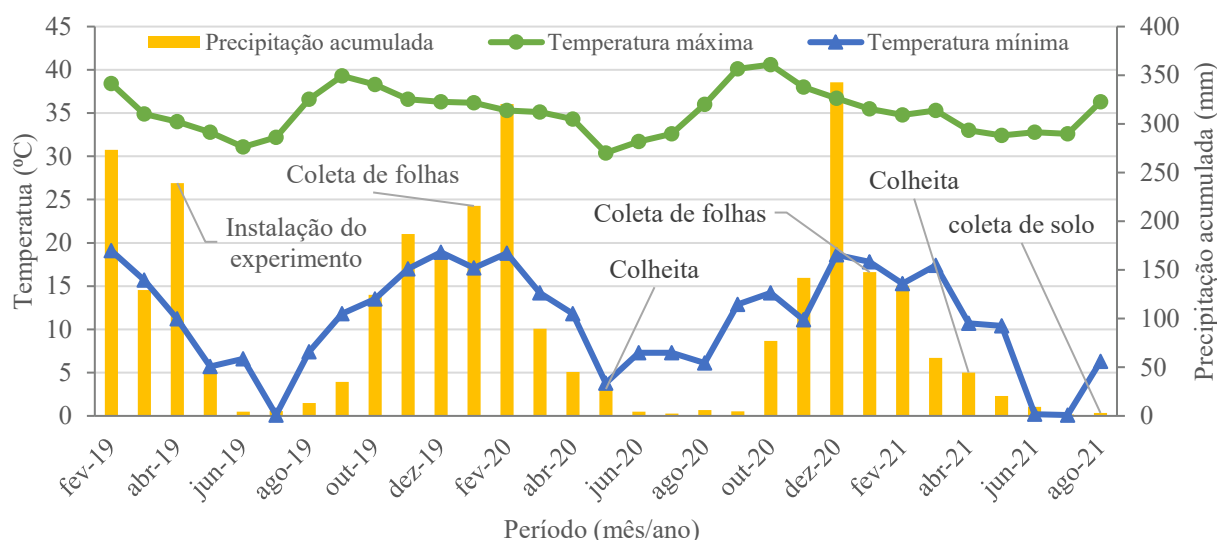


Figura 1. Precipitação mensal e temperaturas médias, de fevereiro de 2019 a outubro de 2021, da região da área experimental. Dados fornecidos pelo Usina Santo Ângelo, localizada no município de Pirajuba, no Estado de Minas Gerais, Brasil.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 2018b). A caracterização química, física e mineralógica do solo é apresentada nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental

Prof. (cm)	M.O. dag kg ⁻¹	pH CaCl ₂	P - mg dm ⁻³	Si	K _{res}	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	M
								cmol _c dm ⁻³					%
0-20	2,5	5,8	29,3	3,5	0,09	3,0	1,2	0,0	2,1	4,4	6,5	68,0	0,0
20-40	1,2	5,0	4,2	1,9	0,07	1,1	0,3	0,4	3,2	1,6	4,8	33,0	20,0
80-120	0,7	4,9	0,7	-	0,04	0,4	0,1	0,5	2,5	0,5	3,0	17,0	50,0

pH: CaCl₂; P, K_{res}: resina; Al, Ca, Mg: KCl 1 mol L⁻¹; SB: soma de bases; T: CTC a pH 7; V: saturação por bases, m: saturação por alumínio. (SILVA, 2009), Si: CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (Korndörfer et al., 2004)

Tabela 2. Caracterização física e mineralógica da área experimental

Prof. (cm)	Areia	Silte	Argila	Mineralogia*
	----- % -----			
0-20	70,0	10,0	20,0	quartzo (SiO ₂), gibbsita (Al(OH) ₃) e anatásio (TiO ₂)
20-40	67,5	7,5	25,0	quartzo (SiO ₂), gibbsita (Al(OH) ₃) e anatásio (TiO ₂)
80-120	67,5	7,5	25,0	quartzo (SiO ₂), gibbsita (Al(OH) ₃) e anatásio (TiO ₂)

*procedimento realizado utilizando difratometria de raios X (DRX) na unidade de pesquisa do Campo do Meio do Grupo Curimbaba, Poços de Caldas-MG

O experimento foi conduzido em delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3 x 3 + 2, com 4 repetições, constituído de três fontes de potássio, três doses, mais dois tratamentos adicionais (KCl na operação do quebra-lombo e um controle sem

a aplicação de K_2O), conforme apresentado na tabela 3. As unidades experimentais (parcelas) foram constituídas por 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si. A área de cultivo de cada parcela foi de 75 m², sendo que, entre cada uma das parcelas, adotou-se ainda um espaçamento de 3 m nas cabeceiras.

Tabela 3. Doses, produtos e formas de aplicação de cada tratamento

Tratamentos	Dose de K_2O (kg ha ⁻¹)	Forma de aplicação (kg ha ⁻¹)
Testemunha	0	-
Fonolito	60	Área total
Fonolito	120	Área total
Fonolito	240	Área total
Fonolito com KCl	60	Área total
Fonolito com KCl	120	Área total
Fonolito com KCl	240	Área total
KCl	60	Sulco
KCl	120	Sulco
KCl	240	Sulco
KCl	120	Quebra-lombo

As fontes utilizadas foram: fonte padrão KCl, fonolito de Poços de Caldas-MG e fonolito com KCl (comercializado como Ekosil® e Ekosil® Plus 16, respectivamente, produtos comercializados pela Yoorin® Fertilizantes), com suas garantias e especificações granulométricas apresentadas na tabela 4.

Tabela 4. Garantias e especificação granulométrica das fontes de potássio

Fonte	K_2O total	K_2O sol. a.c. 2%	K_2O sol. água	Si total	Especificação granulométrica
Fonolito *	8	1,0	-	25	Pó**
Fonolito com KCl	16	11	10	19	Granulado
KCl	60	-	60	-	Granulado

** teores totais dos macronutrientes secundários e micronutrientes existentes naturalmente no produto: Ca= 1%; Mg =0,15%; N_2O =7,0% B =0,007%; Co= 0,0004%; Mn= 0,15%; Mo = 0,0015% e Zn= 0,002% (p/p); **passante 100% na peneira de 50 mesh (<0,297mm), passante 99% na peneira de 100 mesh (<0,149mm), passante 87% na peneira de 200 mesh (<0,74mm) e passante 58% na peneira de 635 mesh (<0,02mm).

No dia 18 de abril de 2019, os tratamentos foram aplicados de forma manual. As fontes fonolito e o fonolito com KCl foram aplicadas em área total, a lanço, após a abertura dos sulcos de plantio e antes de colocar os toletes no fundo do sulco (Figura 2). A fonte KCl foi aplicada dentro do sulco, na mesma data do plantio e aos 74 dias após o plantio (DAP), na operação do quebra-lombo. No mesmo dia da aplicação dos tratamentos, foi realizado o plantio da cana-de-açúcar utilizando-se 152 kg ha⁻¹ de P_2O_5 aplicado no sulco de plantio, na forma de fosfato

monoamônio (11% de N e 52% de P_2O_5). Na operação de quebra-lombo, foi realizada a adubação nitrogenada, utilizando-se 80 kg ha^{-1} de nitrogênio na forma de nitrato de amônio (33% de N).

Na soqueira, foi realizada a aplicação de 120 kg ha^{-1} de N utilizando-se o nitrato de amônio (33% de N) e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 utilizando-se o superfosfato triplo (44% de P_2O_5), em uma faixa de aproximadamente 60 cm sobre a linha de brotação da soqueira. Não houve reaplicação de fontes de potássio na soqueira.



Figura 2. Implantação do experimento e aplicação dos tratamentos

Em janeiro de 2020 e 2021, aos 272 e aos 651 dias após a aplicação (DAA), foram coletadas amostras de folhas para análise dos teores de potássio (K), sódio (Na), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), segundo metodologias propostas por Silva (2009), bem como para silício (Si) (Korndörfer et al., 2004). Coletaram-se duas folhas (TVD - Top Visible Dewlap) de cada uma das 5 linhas da parcela. A TVD é definida como a primeira folha com a lígula visível, da qual foi retirado o terço médio e a nervura central para a posterior análise laboratorial.

Aos 386 DAA e aos 740 DAA, maio de 2020 e abril de 2021, respectivamente, realizou-se a colheita manual da cana-de-açúcar de 3 metros lineares das três linhas centrais de cada parcela, totalizando-se uma área de colheita de 9 metros lineares por parcela. Após o desponte e a retirada

do excesso de palha, a pesagem da cana colhida foi realizada com o auxílio de uma balança acoplada à um tripé de sustentação. A produtividade de colmos por hectare (TCH) foi determinada convertendo-se os pesos obtidos por parcela para $t\ ha^{-1}$. No momento das colheitas, foi avaliada, aleatoriamente, a altura dos colmos (m) de 3 plantas de cada parcela através medição do ponto de corte ao ponto de quebra.

Para a realização das análises de qualidade da matéria-prima, foram amostrados, no momento das colheitas, 8 colmos seguidos da linha central da parcela. Em seguida, os materiais obtidos foram submetidos à análise tecnológica no laboratório da Usina Santo Ângelo, seguindo-se metodologia proposta por CONSECANA (2006). Determinou-se o açúcar total recuperável (ATR em $kg\ t^{-1}$), o qual foi usado também para o cálculo da produção de açúcar por hectare (TAH em $t\ ha^{-1}$), multiplicando-o pelo TCH.

Foram colhidas amostras de solo nos tratamentos com fonolito, fonolito com KCl e controle, coletando-se três amostras por parcela na entrelinha da cana-de-açúcar, para análise dos teores de K (extrator resina) e Si disponível, seguindo-se metodologias propostas por Silva (2009) e Korndörfer et al. (2004), respectivamente, em agosto de 2021, aos 837 DAA.

Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o programa ASSISTAT versão 7.6. beta (SILVA; AZEVEDO, 2016), sendo as médias comparadas pelos testes de Tukey e Dunnet (comparação com o controle e com tratamento com KCl no quebra-lombo), ambos a 0,05 de significância. Para a variável dose, realizou-se análise de regressão com auxílio dos programas estatísticos Sisvar (versão 5.3) (FERREIRA, 2014) e SigmaPlot (versão 11.0) (SYSTAT SOFTWARE, 2009) a 0,1 de significância.

Independentemente de ter ocorrido uma interação entre as fontes e doses das fontes de potássio, foram calculados o aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de potássio, a produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%) e o índice de eficiência agrônômica (IEA), calculado como a razão percentual entre os rendimentos resultantes das fontes de K aplicadas na mesma dose. O rendimento obtido no tratamento sem aplicação de K foi subtraído de ambos os rendimentos, como segue: $IEA (\%) = (X1/X2) \times 100$, onde X1 é rendimento com uma fonte alternativa (fonolito ou fonolito com KCl) na dose correspondente; e X2 é o rendimento com a fonte tradicional (KCl) na dose correspondente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores foliares de K, Si, Na, Cu, Fe, Mn e Zn em cana planta e cana soca, independentemente da dose, fonte e modo de aplicação ficaram dentro da faixa de suficiência preconizada por Raij et al. (1997) (Tabela 5 e 6). Para cana planta não foram verificadas diferenças significativas para os teores foliares de K, Si, Na, Cu, Fe, Mn e Zn. Para cana soca, verificou-se diferença para os valores de Si, Cu, Mn e Zn.

Os teores de Na foliar na cana soca ficaram abaixo do limite de detecção do método utilizado, impossibilitando a quantificação deste elemento. Apesar de Tavares et al. (2018) e Reis (2022) verificarem que o sódio presente no fonolito é disponibilizado ao solo, não foi possível verificar a presença desse elemento nas folhas de cana-de-açúcar. Entre a aplicação do fonolito e a coleta de folhas para diagnose foliar decorreram-se 272 dias, com acúmulo superior a 600 mm de chuva, o que possivelmente acarretou a lixiviação desse cátion, o qual é reconhecidamente menos retido em comparação com K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} (série liotrópica).

Na soqueira, maiores teores médios de Si foram obtidos com a aplicação do fonolito e do fonolito com KCl, com acréscimos em relação ao KCl de 2,7 e 1,5 g kg⁻¹ de Si, respectivamente (Tabela 6). Ressalta-se ainda que a aplicação da maior dose de fonolito (240 kg ha⁻¹ de K₂O) resultou em teores superiores ao controle e ao KCl no quebra-lombo (presença do * e do +), com ganhos de até 5,0 g kg⁻¹ de Si (Tabela 6).

As concentrações de silício foliar apresentam ampla faixa de variação. De fato, Anderson e Bowen (1992) citam níveis adequados de Si foliar tão variáveis quanto 10,6 a 30,5 g kg⁻¹ em Maurícios, acima de 12 g kg⁻¹ na África do Sul, acima de 15 g kg⁻¹ no Havaí (EUA) e de 15 a 40 g kg⁻¹ na Flórida (EUA), enquanto Datnoff et al. (2001) citam de 7,0 a 19,0 g kg⁻¹ com o intervalo de Si no tecido de folhas de cana-de-açúcar. Camargo & Keeping (2021), em um estudo de revisão de literatura, indicam que valores inferiores a 6 g kg⁻¹ de Si em folhas de TVD coletadas durante o maior período de crescimento não são suficientes para que as plantas de cana-de-açúcar atinjam o rendimento máximo.

Quanto aos micronutrientes na soqueira, nota-se que, maiores teores de Cu foram obtidos com a aplicação da maior dose de potássio quando utilizado o fonolito com KCl, sendo superior ao fonolito, e o KCl equivalente ao fonolito e ao fonolito com KCl. Para os teores de Mn, na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O, a aplicação do fonolito com KCl, resultou em teores superiores ao fonolito e ao KCl, como também ao KCl aplicada no quebra-lombo, e ao tratamento controle (presença do + e *, respectivamente). Na dose de 240 kg ha⁻¹, o fonolito com KCl também foi superior as fontes

fonolito e KCl (Tabela 6). Para os teores de Zn, a média do fonolito com KCl foi superior ao KCl, porem o fonolito foi equivalente aos teores do fonolito com KCl e KCl (Tabela 6).

Tabela 5. Teores de K, Si, Na, Cu, Fe, Mn e Zn em folhas da cana planta em resposta a aplicação de doses e fontes de potássio.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	K na cana planta (g kg ⁻¹)			Média
	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	
0	13,1			
60	13,1	12,6	13,1	13,0
120	13,3	13,5	13,1	13,3
240	13,5	13,5	14,1	13,7
Média	13,3 a	13,2 a	13,5 a	
KCl (quebra-lombo)¹	13,5			
	Si na cana planta (g kg ⁻¹)			
0	29,1			
60	29,3	30,9	27,6	29,3
120	31,5	29,5	27,4	29,5
240	33,8 ⁺	31,2	28,8	31,3
Média	31,5 a	30,6 a	27,9 a	
KCl (quebra-lombo)¹	24,1			
	Na na cana planta (mg kg ⁻¹)			
0	50,8			
60	52,0	48,0	51,3	50,4
120	40,0	56,3	63,3	53,2
240	49,0	51,5	50,0	50,2
Média	47,0 a	51,9 a	54,9 a	
KCl (quebra-lombo)¹	56,5			

...continua...

Cu na cana planta (mg kg⁻¹)				
0	5,3			
60	4,6	6,4	4,7	5,2
120	8,4	4,6	6,4	6,5
240	5,5	5,9	9,2	6,9
Média	6,2 a	5,6 a	6,7 a	
KCl (quebra-lombo)¹	4,5			
Fe na cana planta (mg kg⁻¹)				
0	70,7			
60	75,3	74,0	73,0	74,1
120	72,3	71,0	80,0	74,4
240	75,3	74,3	85,0	78,2
Média	74,3 a	73,1 a	79,3 a	
KCl (quebra-lombo)¹	78,0			
Mn na cana planta (mg kg⁻¹)				
0	139,0			
60	134,0	149,0	131,0	138,0
120	133,0	155,5	137,5	142,1
240	142,8	159,5	154,3	152,2
Média	136,7 a	154,7 a	140,9 a	
KCl (quebra-lombo)¹	142,8			
Zn na cana planta (mg kg⁻¹)				
0	15,0			
60	14,8	13,9	14,7	14,5
120	14,2	13,8	15,3	14,4
240	14,2	13,3	14,5	14,0
Média	14,4 a	13,7 a	14,8 a	
KCl (quebra-lombo)¹	13,8			

K: CV: 5,0%; DMSTukey: 0,7; DMSDunnet: 1,4. **Si:** CV: 14,2%; DMSTukey: 4,2; DMSDunnet: 8,5.

Na: CV: 23,1%; DMSTukey: 12,0; DMSDunnet: 24,4. **Cu:** CV: 45,9%; DMSTukey: 2,7; DMSDunnet: 5,6.

Fe: CV: 13,3%; DMSTukey: 10,1; DMSDunnet: 20,5. **Mn:** CV: 18,3%; DMSTukey: 26,4; DMSDunnet: 53,6.

Zn: CV: 9,5%; DMSTukey: 1,4; DMSDunnet: 2,8.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. ⁽¹⁾ 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Tabela 6. Teores de K, Si, Na, Cu, Fe, Mn e Zn em folhas da cana soca em resposta a aplicação de doses e fontes de potássio.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média
	K na cana soca (g kg ⁻¹)			
0	13,5			
60	14,0	14,5	14,7	14,4
120	14,3	14,0	14,3	14,2
240	15,0	14,5	14,0	14,5
Média	14,4 a	14,3 a	14,3 a	
KCl (quebra-lombo)¹				
14,0				
Si na cana soca (g kg⁻¹)				
0	12,2			
60	14,3	12,9	11,9	13,0
120	13,4	13,1	11,7	12,7
240	16,2*+	14,4	12,1	14,2
Média	14,6 a	13,4 a	11,9 b	
KCl (quebra-lombo)¹				
11,1				
Cu na cana soca (mg kg⁻¹)				
0	28,0			
60	30,3 a	24,8 a	28,8 a	27,9
120	27,8 a	30,5 a	28,3 a	28,9
240	24,6 b	31,7 a	27,3 ab	27,9
Média	27,6	29,0	28,1	
KCl (quebra-lombo)¹				
28,0				
Fe na cana soca (mg kg⁻¹)				
0	130,0			
60	117,8	122,3	139,7	123,3
120	139,3	137,8	120,7	132,6
240	144,7	123,3	125,0	131,0
Média	133,9 a	127,8 a	125,1 a	
KCl (quebra-lombo)¹				
120,8				
Mn na cana soca (mg kg⁻¹)				
0	129,3			
60	129,7 a	128,0 a	126,0 a	127,9
120	135,3 b	172,3 a*+	126,3 b	144,6
240	123,3 b	152,3 a	123,7 b	133,1
Média	129,4	150,9	125,3	
KCl (quebra-lombo)¹				
127,3				

...continua...

Zn na cana soca (mg kg⁻¹)				
0		20,0		
60	20,7	23,3	19,8	21,3
120	21,7	26,5	19,8	22,6
240	23,3	23,5	19,0	21,9
Média	21,9 ab	24,4 a	19,5 b	
KCl (quebra-lombo)¹		19,0		

K: CV: 5,7%; DMSTukey: 0,8; DMSDunnet: 1,7. **Si:** CV: 9,7%; DMSTukey: 1,3; DMSDunnet: 2,6.

Na: CV: 23,1%; DMSTukey: 12,0; DMSDunnet: 24,4. **Cu:** CV: 13,6%; DMSTukey: 6,7. DMSDunnet: 7,8.

Fe: CV: 11,2%; DMSTukey: 14,4; DMSDunnet: 29,3. **Mn:** CV: 10,9%; DMSTukey: 25,5; DMSDunnet: 29,9.

Zn: CV: 919,4%; DMSTukey: 4,2; DMSDunnet: 8,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. * Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância. + Difere do tratamento KCl (quebra-lombo) a pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância. ⁽¹⁾ 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos que demonstrem o efeito da aplicação de doses crescentes de fonolito, fonolito com KCl e KCl nos teores foliares de Na, Cu, Fe, Mn e Zn na cana planta e na cana soca. Para o K, observa-se efeito significativo ao se avaliarem as médias das três fontes, com acréscimos lineares na cana planta, com aumento de 0,3 g kg⁻¹ de K a cada 100 kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 3a). Na soqueira, observa-se ajuste ao modelo polinomial quadrático, cujos melhores resultados são obtidos na dose de 188 kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 3b). Em relação ao Si, verifica-se efeito significativo apenas na soqueira, com incremento linear em função da média das três fontes (Figura 3c).

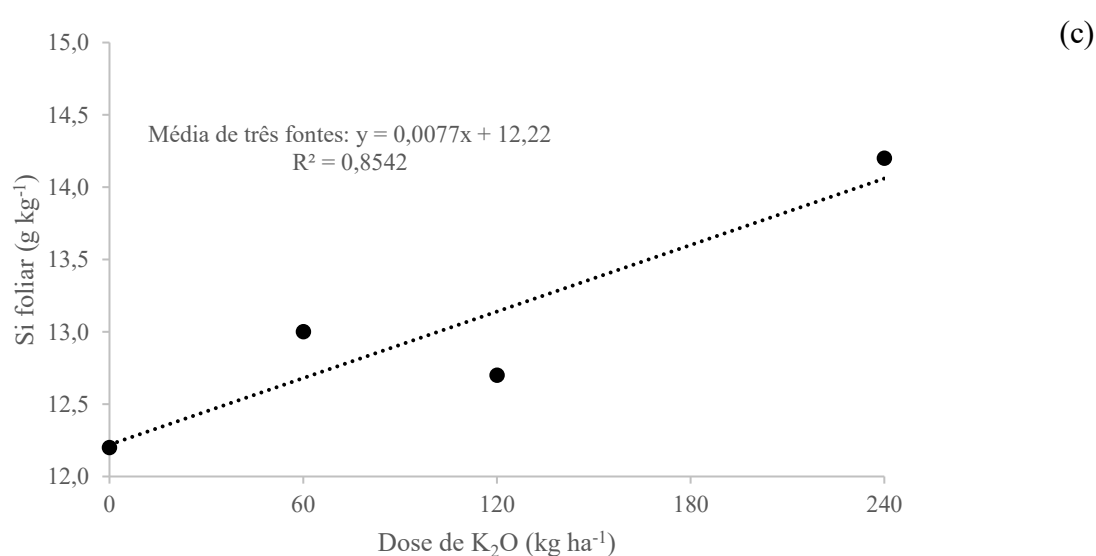
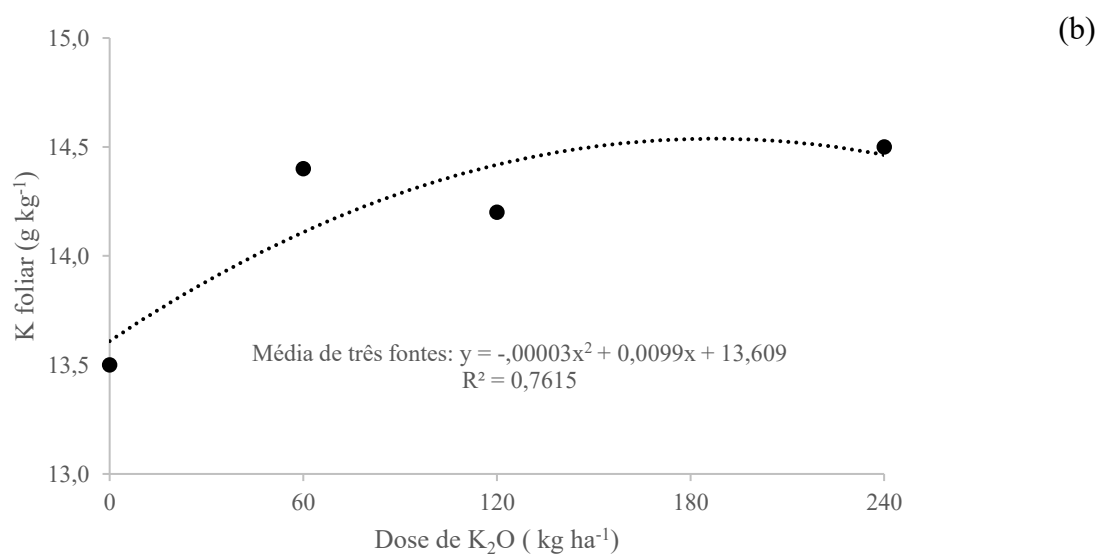
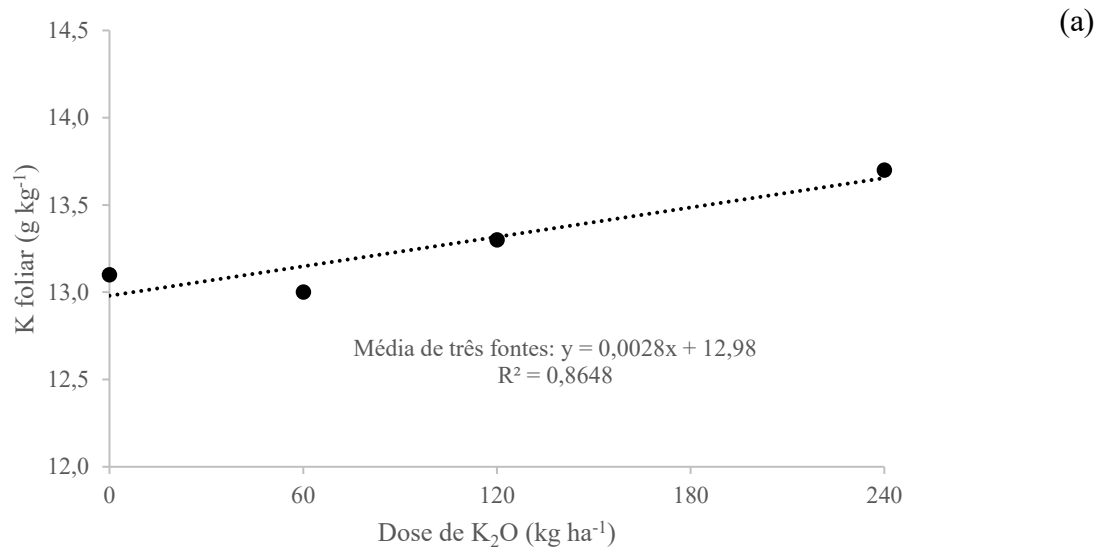


Figura 4. Teores de K (a) cana planta, K (b) e Si (c) em folhas da cana soca após a aplicação de doses de K₂O e fontes de potássio.

Camargo & Keeping (2021) indicam que a resposta a adubação com silício é esperada quando valores inferiores a 10 mg kg^{-1} Si em $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ CaCl_2 , em solos minerais, ou inferiores a 15 mg kg^{-1} Si em $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ de ácido acético, em solos orgânicos. Além disso, a avaliação dos tecidos foliares também é confiável para mostrar o fornecimento adequado de Si à cana-de-açúcar.

Berthelsen et al. (2002) classificaram os solos quanto ao teor de silício extraído com CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em quatro classes: 1 - muito baixa ($0-5 \text{ mg kg}^{-1}$); 2 - baixa ($5-10 \text{ mg kg}^{-1}$), 3 - limitante ($10-20 \text{ mg kg}^{-1}$) e 4 - adequada ($> 20 \text{ mg kg}^{-1}$) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Em relação às produtividades de colmos (TCH) não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos tanto para cana planta, cana soca e acumulado, (Tabelas 7).

Tabela 7. Produtividade de colmos (TCH) da cana planta e da cana soca e valores acumulados dos dois cortes, após a aplicação de doses e fontes de potássio.

Dose de K_2O (kg ha^{-1})	fonolito	fonolito com KCl	KCl	Média
	TCH cana planta (t ha^{-1})			
0	163,0			
60	164,2	164,8	173,5	167,5
120	164,5	165,0	165,6	165,0
240	168,0	172,8	175,6	172,1
Média	165,6 a	167,5 a	171,6 a	
KCl (quebra-lombo) ¹		168,3		
TCH cana soca (t ha^{-1})				
0	140,8			
60	147,8	141,9	143,3	144,3
120	149,6	142,2	144,7	145,5
240	152,6	153,3	144,4	150,1
Média	150,0 a	145,8 a	144,2 a	
KCl (quebra-lombo) ¹		150,4		
TCH acumulado (t ha^{-1})				
0	303,8			
60	312,0	306,6	316,8	311,8
120	314,2	307,2	310,3	310,6
240	320,5	326,2	320,1	322,3
Média	315,6 a	313,3 a	315,7 a	
KCl (quebra-lombo) ¹		318,6		

¹º corte: CV: 8,6%; DMSTukey: 14,5; DMSDunnet: 29,6. 2º corte: CV: 8,3%; DMSTukey: 12,3; DMSDunnet: 24,9. Acumulado: CV: 6,4%; DMSTukey: 20,2; DMSDunnet: 41,2.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. ⁽¹⁾ 120 kg ha^{-1} de K_2O .

Quanto à produtividade de açúcar (TAH), não foi verificada diferença para cana planta e acumulado, mas na soqueira, valores superiores ao controle (presença do *) foram obtidos com a aplicação da maior dose do fonolito com KCl (240 kg ha^{-1} de K_2O), com ganhos de $3,7 \text{ t ha}^{-1}$ (Tabela 8).

Tabela 8. Produtividade de açúcar (TAH) da cana planta e da cana soca e valores acumulados dos dois cortes após a aplicação de doses e fontes de potássio.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	fonolito	fonolito com KCl	KCl	Média
	TAH cana planta (t ha ⁻¹)			
0	22,1			
60	22,3	23,6	24,7	23,6
120	22,8	22,1	22,0	22,3
240	24,0	23,3	25,4	24,2
Média	23,0 a	23,0 a	24,0 a	
KCl (quebra-lombo)¹	23,3			
TAH cana soca (t ha ⁻¹)				
0	14,7			
60	16,6	16,2	16,9	16,6
120	16,5	16,1	16,1	16,2
240	16,7	18,4*	16,5	17,2
Média	16,6 a	16,9 a	16,5 a	
KCl (quebra-lombo)¹	16,3			
TAH acumulado (t ha ⁻¹)				
0	36,9			
60	38,9	39,8	41,6	40,1
120	39,2	38,2	38,1	38,5
240	40,6	41,7	41,8	41,4
Média	39,6 a	39,9 a	40,5 a	
KCl (quebra-lombo)¹	39,7			

1º corte: CV: 8,9%; DMSTukey: 2,1; DMSDunnet: 4,2. 2º corte: CV: 10,1%; DMSTukey: 1,7; DMSDunnet: 3,4. Acumulado: CV: 6,9%; DMSTukey: 2,7; DMSDunnet: 5,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. * Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância. ⁽¹⁾ 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Para cana planta os valores de ATR não foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 9). Na soqueira, a aplicação da maior dose de fonolito com KCl resultou em valores ATR superiores ao controle e ao KCl no quebra-lombo (presença do * e +), com ganhos de aproximadamente 15 e 11 kg t⁻¹, respectivamente, e a menor dose de KCl, apresentou valores superiores ao controle (presença do *). Além disso, nota-se que o fonolito com KCl resultou em valores médios superiores à fonte fonolito, com acréscimos de 5 kg t⁻¹ (Tabela 9).

Ao se avaliar a média do ATR dos dois cortes, observa-se que valores superiores ao controle foram obtidos com a aplicação do fonolito com KCl e KCl nas doses de 60 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O (presença do *), e valores superiores a menor dose de KCl aplicado no quebra-lombo (presença do +) (Tabela 9).

Tabela 9. Açúcar total recuperável (ATR) da cana planta e da cana soca e valores médios dos dois cortes, em resposta a aplicação de doses e fontes de potássio.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média
	ATR cana planta (kg t ⁻¹)			
0	135,7			
60	136,1	143,5	142,5	140,7
120	138,5	134,0	133,4	135,3
240	143,3	135,6	144,3	141,1
Média	139,3 a	137,7 a	140,1 a	
KCl (quebra-lombo)¹	139,1			
ATR cana soca (kg t ⁻¹)				
0	104,5			
60	112,2	114,0	118,2*	114,8
120	109,7	112,9	111,2	111,3
240	109,1	119,3*+	114,1	114,1
Média	110,3 b	115,4 a	114,5 ab	
KCl (quebra-lombo)¹	108,4			
ATR médio (kg t ⁻¹)				
0	120,1			
60	124,1	128,7*	130,4*+	127,7
120	124,1	123,5	122,3	123,3
240	126,2	127,5*	129,2*	127,6
Média	124,8 a	126,6 a	127,3 a	
KCl (quebra-lombo)¹	123,8			

¹o corte: CV: 3,3%; DMSTukey: 4,5; DMSDunnet: 9,2. ²o corte: CV: 3,3%; DMSTukey: 4,4; DMSDunnet: 10,2.

Médio: CV: 2,5%; DMSTukey: 3,2; DMSDunnet: 6,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. * Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância. + Difere do tratamento KCl (quebra-lombo) a pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância. ⁽¹⁾ 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Não foi obtido ajuste de modelo de regressão significativo que demonstrasse o efeito das doses crescentes de K₂O na produtividade de colmos e de açúcar da cana planta (Figura 5). Quanto ao ATR, a aplicação de doses crescentes de K₂O através da fonte fonolito resultou em acréscimos lineares de 3,3 kg t⁻¹ a cada 100 kg ha⁻¹ de K₂O adicionados (Figura 5).

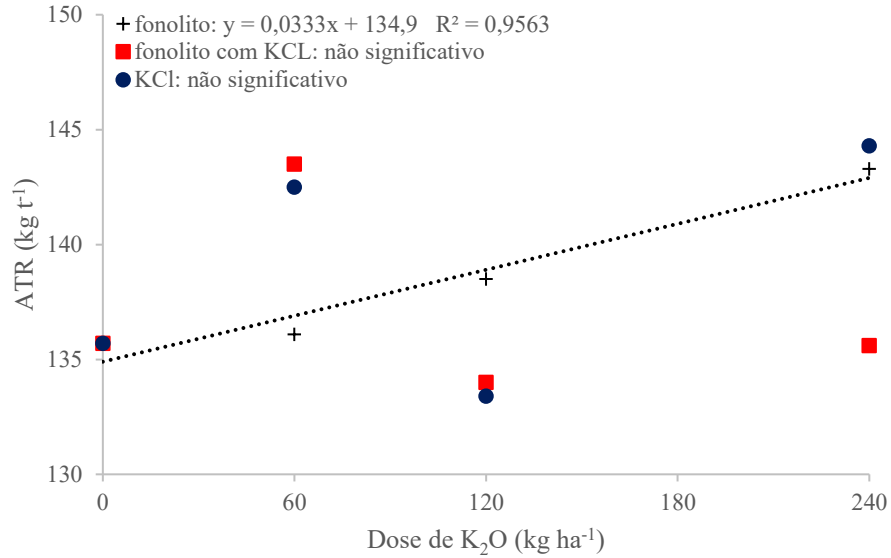
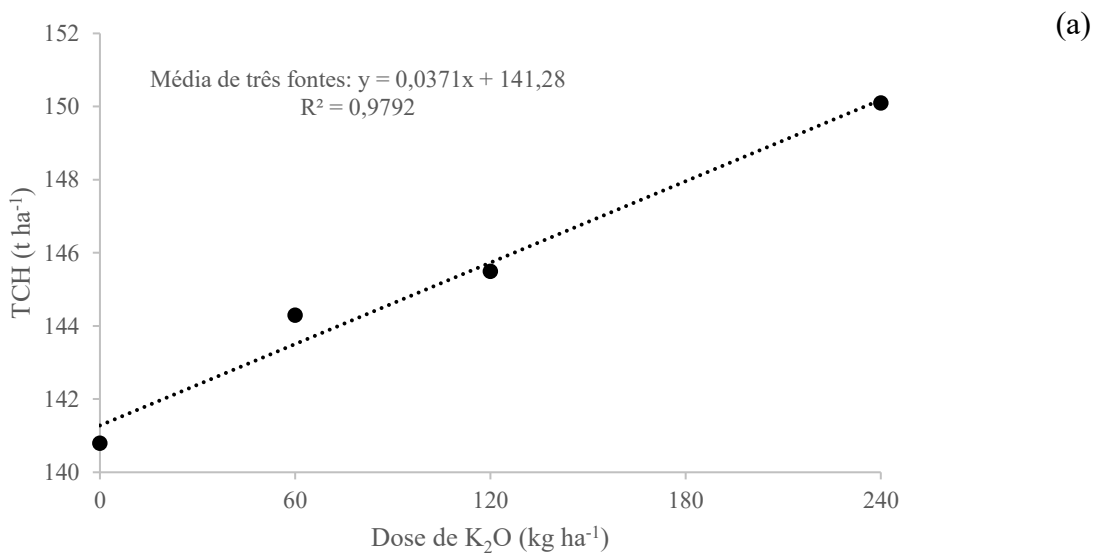


Figura 5. Açúcar total recuperável (ATR) da cana planta em resposta a aplicação de doses e fontes de potássio.

Observa-se na figura 6 que, apesar de não ter sido obtida interação significativa entre as fontes, acréscimos lineares são observados ao se avaliar a média das três fontes na soqueira, com ganhos de 3,7 toneladas de colmos por hectare, 0,9 toneladas de açúcar por hectare e 0,03 kg de açúcar por hectare a cada 100 kg ha⁻¹ de K₂O aplicados no plantio (Figura 6).



...continua...

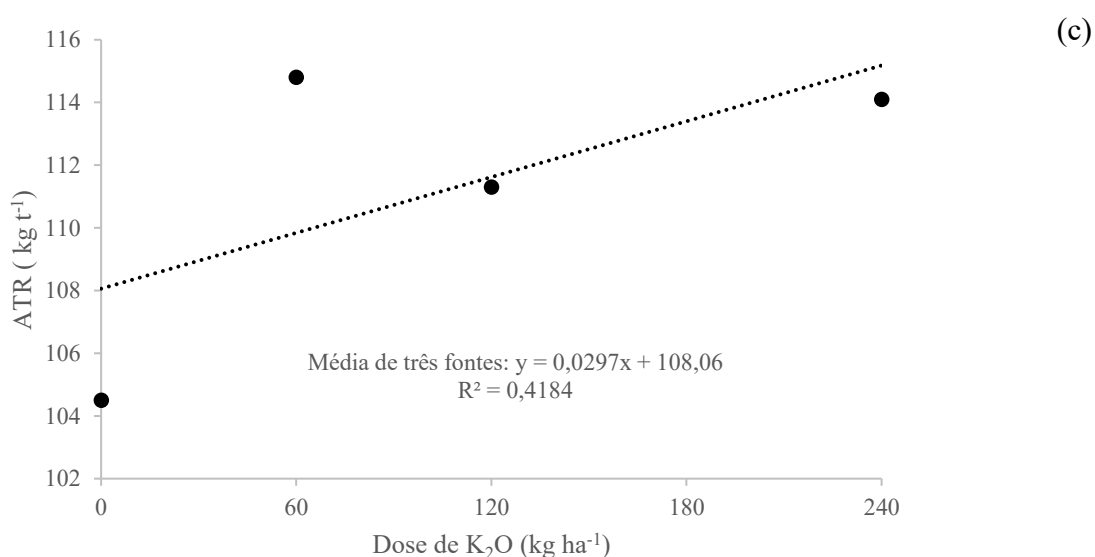
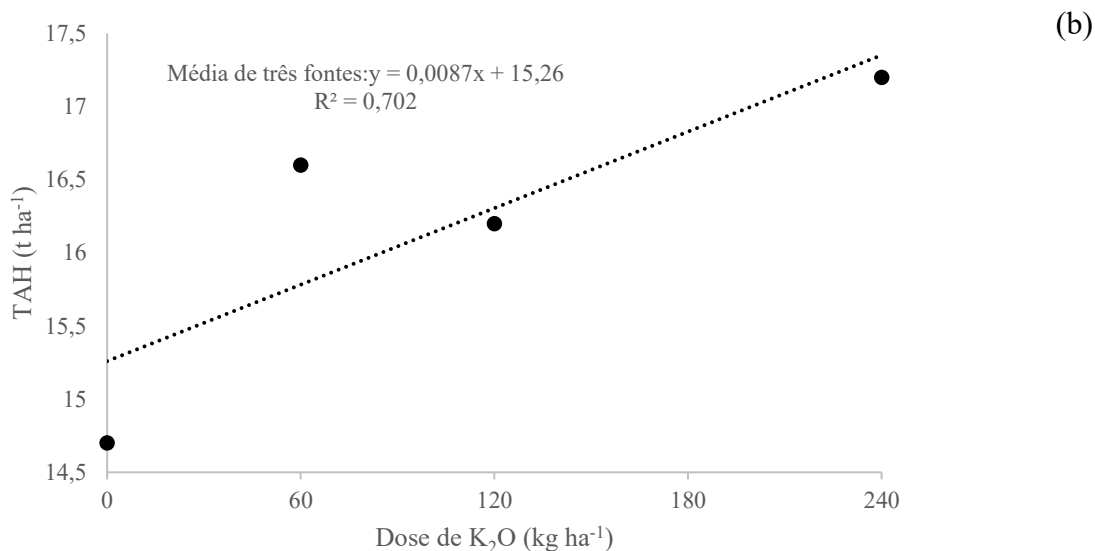


Figura 6. Produtividade de colmos (TCH) (a), açúcar (TAH) (b) e açúcar total recuperável (ATR) (c) da cana soca em resposta a aplicação de doses e fontes de potássio.

Quanto aos valores acumulados dos dois cortes, modelos significativos foram obtidos somente para os valores de TCH e TAH, com acréscimos lineares de 7,1 toneladas de colmos por hectare e 1,5 toneladas de açúcar por hectare a cada 100 kg ha⁻¹ de K₂O aplicados no plantio (médias das três fontes) (Figura 7).

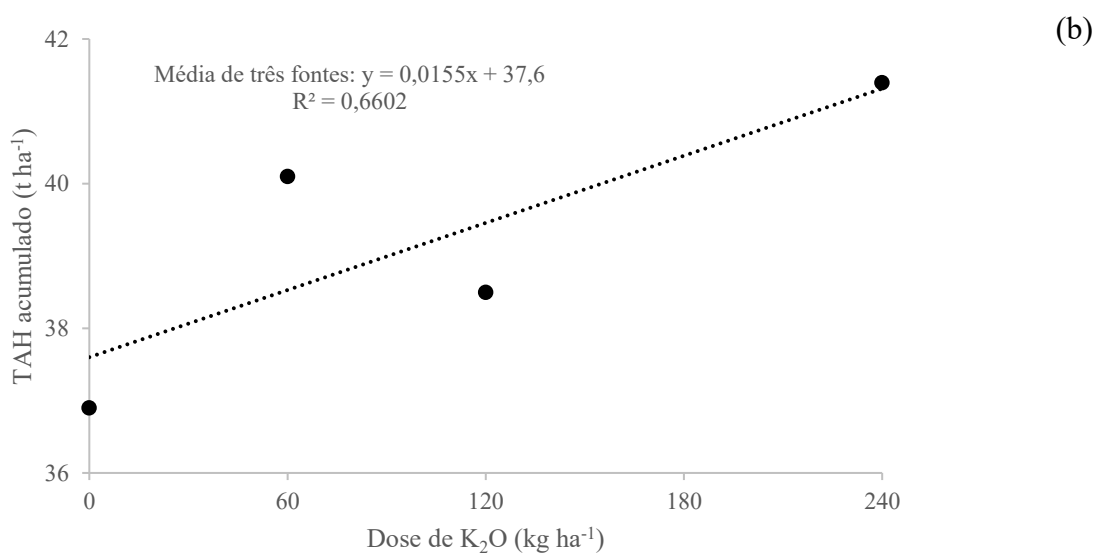
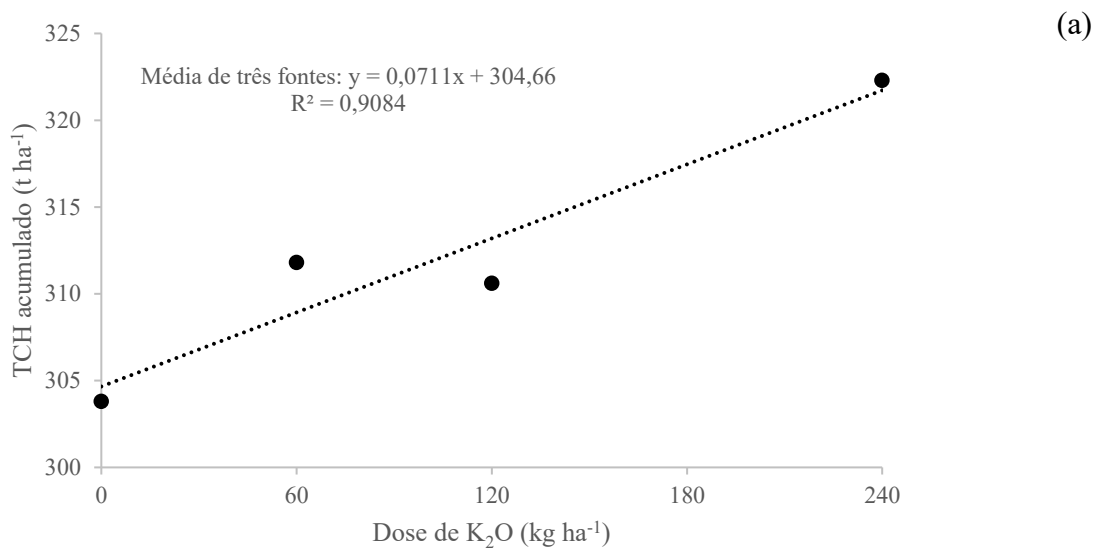


Figura 7. Valores acumulados de TCH (a) e TAH (b) após a aplicação de doses e fontes de potássio.

Em relação à altura de plantas da cana planta e cana soca, não foram obtidas diferenças significativas (Tabela 10).

Tabela 10. Altura da cana planta e da cana soca no momento da colheita, em resposta a aplicação de doses e fontes de potássio.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média
	Altura da cana planta (m)			
0	3,1			
60	3,2	3,2	3,3	3,2
120	3,2	3,2	3,3	3,2
240	3,2	3,3	3,2	3,2
Média	3,2 a	3,2 a	3,3 a	
KCl (quebra-lombo)¹	3,2			
Altura da cana soca (m)				
0	2,6			
60	2,8	2,8	2,7	2,8
120	2,7	2,9	2,8	2,8
240	2,7	2,7	2,8	2,8
Média	2,8 a	2,7 a	2,8 a	
KCl (quebra-lombo)¹	2,8			

CP: CV: 4,6%; DMSTukey: 0,1; DMSDunnet: 0,3. CS: CV: 4,7%; DMSTukey: 0,1; DMSDunnet: 0,3.
Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. ⁽¹⁾ 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos que demonstrassem o efeito das doses crescentes de fonolito, fonolito com KCl e KCl nos valores de altura de plantas de cana planta e cana soca.

A utilização do fonolito de Poços de Caldas-MG como fonte de potássio, tem se mostrado promissora para diversas culturas. Soratto et al. (2021a), ao avaliarem o efeito de doses (0, 20, 40 e 80 kg ha⁻¹ de K₂O) e fontes de potássio em um Latossolo Vermelho distroférico com teor de K no solo de 0,14 cmol_c dm⁻³, verificaram que a produtividade de grãos para cultura do feijão e arroz de terras altas foram similares àquelas obtidas com o uso do KCl. Em relação às concentrações de K nas folhas, para ambas as culturas, houve efeito das fontes e doses. A concentração de K foliar foi sempre maior quando foi usado o KCl, tanto para o arroz como para ao feijão. Os autores indicam que um fertilizante de liberação lenta ou levemente solúvel em água seria vantajoso, conforme indicado pelos resultados para concentração de K foliar e produtividade de grãos da cultura do arroz de terras altas com a aplicação das maiores doses de fonolito.

Ao avaliar o efeito de fontes (KCl, fonolito e rocha potássica calcinada) e doses de potássio (0, 25, 50 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O) na cultura da soja e do milho, em um Latossolo Vermelho distroférico, com teor de K no solo de 0,14 e 0,12 cmol_c dm⁻³, respectivamente, Soratto et al. (2021b) verificaram que as fontes alternativas de potássio apresentaram produtividade equivalentes àquelas alcançadas pela fonte tradicional de KCl. Além disso, o fonolito e a rocha potássica calcinada causarem efeitos residuais maiores que os do KCl, principalmente em culturas

cultivadas cerca de um ano após sua aplicação e sob doses de K superiores às recomendadas para as culturas. Pádua (2012) também observou que a aplicação de rochas fonolíticas mostrou maior viabilidade agrônômica na cultura do girassol e efeito residual na cultura da soja em comparação com o KCl.

Duarte et al. (2013), avaliando o efeito da aplicação de diferentes doses (50, 100 e 200 kg ha⁻¹ de K₂O) e fontes de potássio (fonolito de Poços de Caldas-MG e KCl), aplicadas no sulco de plantio da cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho acriférrico, com baixo teor de potássio (0,08 cmol_c dm⁻³), verificaram que o fonolito não diferiu do controle e nem dos tratamentos com o KCl em relação às variáveis analisadas: altura de plantas, TCH e a qualidade da cana planta (Brix, Pol e ATR). Os autores indicam que apesar de não haver diferença estatística, foi percebido que, na média das doses, o KCl foi 4,6% superior ao fonolito na produção de colmos, indicando que o desempenho agrônômico do fonolito foi prejudicado pela forma de aplicação.

Ao avaliarem o efeito da aplicação de aplicação de cloreto de potássio, vinhaça, fonolito, e fonolito associado à vinhaça, em plantio de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho Distrófico com 0,24 mmol_c dm⁻³ de K, Tranches et al. (2022) não verificaram diferença entre os tratamentos e em relação ao tratamento controle, para número de perfilhos, TCH, Brix, ATR e POL, porém verificaram que a associação entre o fonolito e vinhaça promoveu aumento de 6% de TAH, em relação ao tratamento controle.

Os resultados apresentados vão de acordo com a informações apresentadas por Manning (2018), de que o intemperismo de silicatos de K, mediado pelas comunidades microbianas do solo, ocorre com rapidez suficiente para fornecer nutrientes às plantas em crescimento, enquanto os minerais de silicato têm um papel particular a desempenhar como fertilizantes de Latossolos tropicais, que são tipicamente desenvolvidos através do intemperismo de rochas de silicato e lixiviação profunda de suas bases.

Em relação ao aumento de produtividade e produtividade relativa de TCH de cana planta, cana soca e os acumulados dos dois cortes, independentemente da fonte ou dose utilizada, houve aumento de produtividade e aumento da produtividade relativa em relação ao controle (Tabela 11). Para cana planta, a aplicação de 240 kg ha⁻¹ de K₂O proporcionou o melhor aumento de produtividade para todas as fontes, com aumento médio 9,1 t ha⁻¹, e uma produtividade relativa de 105,6%, sendo que para KCl, fonolito com KCl e fonolito, verificaram-se aumentos de 12,6; 9,8 e 5 t ha⁻¹, e produtividade relativa de 103,1; 106,0 e 107,7%, respectivamente. Para aplicação de KCl na operação de quebra-lombo, verificou aumento de 5,3 t ha⁻¹ e uma produtividade relativa de 103,3%. Na cana soca, os maiores aumentos de produtividade foram verificados com a aplicação de 240 kg ha⁻¹ de K₂O para fonolito com KCl e fonolito, os quais proporcionaram

aumentos de 12,5 e 11,8 t ha⁻¹ respectivamente, e com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de K₂O para o KCl, proporcionando aumento de 3,9 t ha⁻¹. Para aplicação de KCl na operação de quebra-lombo, verificou-se aumento de 9,6 t ha⁻¹. No acumulado dos dois cortes, a aplicação de 240 kg ha⁻¹ de K₂O proporcionou o melhor aumento de produtividade para todas as fontes, com aumento médio de 18,5 t ha⁻¹, sendo que para KCl, fonolito e fonolito com KCl, verificaram-se aumentos de 11,9; 11,8 e 9,5 t ha⁻¹, respectivamente. Para aplicação de KCl na operação de quebra-lombo, verificou-se aumento de 14,8 t ha⁻¹.

Verificou-se que, para o índice de eficiência agrônômica - TCH - cana planta, independentemente da dose ou fonte, os valores ficaram abaixo de 100%, tendo como média 95,4 e 96,6% para fonolito e fonolito com KCl, respectivamente. Exceção ocorreu para o KCl aplicado na operação de quebra-lombo, que apresentou índice de eficiência agrônômica de 101,6%. Já para os valores de TCH cana soca, independentemente da fonte ou dose, foram superiores a 100%, com exceção para as doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ de K₂O utilizando o fonolito com KCl, onde os valores ficaram em 99,0 e 99,2%, respectivamente. O KCl aplicado na operação de quebra-lombo apresentou índice de eficiência agrônômica de 103,9%. Os valores do IEA do TCH acumulado variaram de 96,8 a 103%, sendo os melhores valores obtidos na dose de 240 kg ha⁻¹ utilizando fonolito e fonolito com KCl, 101,2 e 103,0%, respectivamente. O KCl aplicado na operação de quebra-lombo apresentou índice de eficiência agrônômica de 102,7%.

Em relação ao aumento de produtividade e produtividade relativa de TAH da cana planta, cana soca e acumulados dos dois cortes, independentemente da fonte ou dose utilizada, houve aumento de produtividade e aumento da produtividade relativa em relação ao controle, com exceção da dose de 120 kg ha⁻¹ de fonolito com KCl e de KCl, que apresentaram os valores 0,0 e -0,1 para aumento de produtividade e 100 e 99,5% de produtividade relativa, respectivamente (Tabela 12).

Tabela 11. Aumento de produtividade, produtividade relativa e índice de eficiência agrônômica (IEA) de TCH de da cana planta e da cana soca e valores acumulados dos dois cortes, em função das fontes e doses de potássio.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média	Fonolito	Fonolito com KCl
	Aumento de Produtividade (t ha ⁻¹) ¹				Produtividade relativa (%) ²				IEA (%) ³	
TCH cana planta										
60	1,2	1,8	10,5	4,5	100,7	101,1	106,4	102,7	94,6	95,0
120	1,5	2,0	2,6	2,0	100,9	101,2	101,6	101,2	94,8	95,1
240	5,0	9,8	12,6	9,1	103,1	106,0	107,7	105,6	96,8	99,6
Média	2,6	4,5	8,6	-	101,6	102,8	105,2	-	95,4	96,6
KCl quebra-lombo*	5,3		103,3				101,6			
TCH cana soca										
60	7,0	1,1	2,5	3,5	105,0	100,8	101,8	102,5	103,1	99,0
120	8,8	1,4	3,9	4,7	106,3	101,0	102,8	103,4	104,4	99,2
240	11,8	12,5	3,6	9,3	108,4	108,9	102,6	106,6	106,5	107,0
Média	9,2	5,0	3,3	-	106,6	103,6	102,4	-	104,7	101,7
KCl quebra-lombo*	9,6		106,8				103,9			
TCH acumulado										
60	8,2	2,8	13,0	8,0	102,7	100,9	104,3	102,6	98,5	96,8
120	10,4	3,4	6,5	6,8	103,4	101,1	102,1	102,2	99,2	97,0
240	16,7	22,4	16,3	18,5	105,5	107,4	105,4	106,1	101,2	103,0
Média	11,8	9,5	11,9	-	103,9	103,1	103,9	-	99,6	98,9
KCl quebra-lombo*	14,8		104,9				102,7			

(1) Aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de K; (2) Produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%); (3) IEA obtido em relação a fonte tradicional, KCl; * dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

A adubação potássica, independentemente da dose, proporcionou aumento de 0,9; 0,9 e 1,9 no TAH e de 104,2; 104,1 e 108,7% de produtividade relativa na cana planta, para fonolito, fonolito com KCl e KCl, respectivamente, bem como ainda, ganho de 1,2 no TAH e de 105,5% de produtividade relativa para KCl aplicado na operação de quebra-lombo. Para o índice de eficiência agrônômica, independentemente da fonte ou dose, até mesmo para o KCl aplicado na operação de quebra-lombo, os valores foram inferiores a 100%, variando de 89,5 até 97,2%, tendo o fonolito aplicado na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O obtido o melhor índice, e o fonolito com KCl na dose de 120 kg ha⁻¹, obtido o menor valor.

Tabela 12. Aumento de produtividade, produtividade relativa e índice de eficiência agrônômica (IEA) da cana planta, cana soca e acumulado para TAH

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média	Fonolito	Fonolito com KCl	
	Aumento de Produtividade (t ha ⁻¹) ¹				Produtividade relativa (%) ²				IEA (%) ³		
TAH cana planta											
60	0,2	1,5	2,6	1,4	100,9	106,8	111,8	106,5	90,3	95,5	
120	0,7	0,0	- 0,1	0,2	103,2	100,0	99,5	100,9	92,3	89,5	
240	1,9	1,2	3,3	2,1	108,6	105,4	114,9	109,6	97,2	94,3	
Média	0,9	0,9	1,9	-	104,2	104,1	108,7	-	93,3	93,1	
KCl quebra- lombo*	1,2				105,4				94,3		
TAH cana soca											
60	1,9	1,5	2,2	1,9	112,9	110,2	115,0	112,7	98,2	95,9	
120	1,8	1,4	1,4	1,5	112,2	109,5	109,5	110,4	97,6	95,3	
240	2,0	3,7	1,8	2,5	113,6	125,2	112,2	117,0	98,8	108,9	
Média	1,9	2,2	1,8	-	112,9	115,0	112,2	-	98,2	100,0	
KCl quebra- lombo*	1,6				110,9				101,2		
TAH acumulado											
60	2,0	2,9	4,7	3,2	105,4	107,9	112,7	108,7	93,5	95,7	
120	2,3	1,3	1,2	1,6	106,2	103,5	103,3	104,3	94,2	91,8	
240	3,7	4,8	4,9	4,5	110,0	113,0	113,3	112,1	97,6	100,2	
Média	2,7	3,0	3,6	-	107,2	108,1	109,8	-	95,1	95,9	
KCl quebra- lombo*	2,8				107,6				104,2		

(1) Aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de K; (2) Produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%); (3) IEA obtido em relação a fonte tradicional, KCl; * dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O

Na cana soca, a utilização do fonolito, fonolito com KCl e KCl, independentemente da dose, proporcionou incrementos de 1,9; 2,2 e 1,8 TAH, e produtividade relativa de 112,9; 115,0 e 112,2%, respectivamente, bem como ganho de 1,6 no TAH e de 110,9% de produtividade relativa para o KCl aplicado na operação de quebra-lombo. O índice de eficiência agrônômica, independentemente da fonte ou dose, apresentou valores inferiores a 100%, com exceção para o fonolito com KCl na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O e o KCl aplicado na operação de quebra-lombo, apresentando 100,0 e 101,2%, respectivamente.

Para o TAH acumulado dos dois cortes, houve aumento de 2,7; 3,0 e 3,6 TAH e produtividade relativa de 107,2; 108,1 e 109,8%, para fonolito, fonolito com KCl e KCl, respectivamente, independentemente da dose de potássio utilizada. Para o KCl aplicado na operação de quebra-lombo, foi observado um aumento de 2,8 para TAH. Para o índice de eficiência agrônômica, foi observada a mesma tendência verificada na cana soca, que independentemente da fonte ou dose, apresentou valores inferiores a 100%, com exceção para o fonolito com KCl na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O e o KCl aplicado na operação de quebra-lombo, aos quais apresentaram valores de 100,2% e 104,2%, respectivamente.

Para os valores de ATR da cana planta, verificou-se que houve aumento de produtividade e da produção relativa para todas as fontes e doses, com exceção do fonolito com KCl e do KCl na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O, bem como do fonolito com KCl na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, que apresentaram valores de -1,7; -2,3 e -0,1 t ha⁻¹ de ATR, respectivamente. Para a média das fontes, verificaram-se aumentos médios de 3,6; 2,0; 4,4 ATR e 102,7; 101,4 e 103,2% de produtividade relativa na cana planta, para fonolito, fonolito com KCl e KCl, respectivamente, e 3,4 t ha⁻¹ ATR e 102,5% de produtividade relativa para KCl aplicado na operação de quebra-lombo (Tabela 13).

Na cana soca, houve aumento de produtividade e produção relativa para todas as fontes e doses, proporcionando aumentos médios de 5,8; 10,9 e 10,0 t ha⁻¹ de ATR e produtividades relativas de 105,6; 110,4 e 109,6%, para fonolito, fonolito com KCl e KCl, respectivamente, e de 3,9 t ha⁻¹ de ATR e 103,7% de produtividade relativa para KCl aplicado na operação de quebra-lombo. O índice de eficiência agrônômica variou de 91,7 a 100,9%, tendo o fonolito com KCl obtido o melhor índice e o KCl aplicado na operação de quebra-lombo, obtido o menor índice.

Para o ATR médio, houve aumento de produtividade e produção relativa para doses, obtendo-se incrementos de 4,7; 6,5 e 7,2 t ha⁻¹ de ATR na média das duas safras e uma produtividade relativa de 103,9; 105,4 e 106,0%, para fonolito, fonolito com KCl e KCl, respectivamente, bem como ganhos de 3,7 t ha⁻¹ de ATR médio e 103,1% de produtividade relativa para KCl aplicado na operação de quebra-lombo. Para o índice de eficiência agrônômica, o melhor índice 101,2% foi obtido pelo KCl aplicado na operação de quebra-lombo e o menor índice foi obtido pelo fonolito com KCl na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Soratto et al. (2021a) verificaram que o IEA para arroz de terras altas, considerando a dose de 40 kg ha⁻¹ de K₂O do fonolito, foi 8% superior ao do KCl; porém, na dose de 20 kg ha⁻¹ de K₂O, esse índice foi inferior ao do KCl, apresentando valores semelhantes na dose de 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Em comparação com o controle (sem aplicação de K), as doses de K com KCl aumentaram a produtividade do arroz, sem diferir entre si e de forma semelhante às maiores doses de fonolito, a

40 e 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Embora as concentrações foliares de K estivessem dentro da faixa recomendada, a produtividade máxima do arroz foi obtida com uma taxa menor do que a necessária para se atingir a concentração máxima de K foliar com a aplicação de KCl. Para o feijoeiro, verificou-se que os valores de IEA do fonolito foram próximos aos de KCl nas doses de 40 e 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Os mesmos autores indicaram que o fonolito fornece K e aumenta a produtividade de grãos do feijão e do arroz de terras altas de forma semelhante ao cloreto de potássio.

Tabela 13. Aumento de produtividade, produtividade relativa e índice de eficiência agrônômica (IEA) da cana planta, cana soca e média das safas para ATR

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média	Fonolito	Fonolito com KCl	KCl	Média	Fonolito	Fonolito com KCl
	Aumento de Produtividade (t ha ⁻¹) ¹				Produtividade relativa (%) ²				IEA (%) ³	
ATR cana planta										
60	0,4	7,8	6,8	5,0	100,3	105,7	105,0	103,7	95,5	100,7
120	2,8	-1,7	-2,3	-0,4	102,1	98,7	98,3	99,7	97,2	94,0
240	7,6	-0,1	8,6	5,4	105,6	99,9	106,3	103,9	100,6	95,2
Média	3,6	2,0	4,4	-	102,7	101,4	103,2	-	97,8	96,6
KCl	3,4				102,5				97,6	
quebra-lombo*	3,4				102,5				97,6	
ATR cana soca										
60	7,7	9,5	13,7	10,3	107,4	109,1	113,1	109,9	94,9	96,4
120	5,2	8,4	6,7	6,8	105,0	108,0	106,4	106,5	92,8	95,5
240	4,6	14,8	9,6	9,7	104,4	114,2	109,2	109,3	92,3	100,9
Média	5,8	10,9	10,0	-	105,6	110,4	109,6	-	93,3	97,6
KCl	3,9				103,7				91,7	
Quebra-lombo*	3,9				103,7				91,7	
ATR médio										
60	4,0	8,6	10,3	7,6	103,3	107,2	108,6	106,4	95,2	98,7
120	4,0	3,4	2,2	3,2	103,3	102,8	101,8	102,6	95,2	94,7
240	6,1	7,4	9,1	7,5	105,1	106,2	107,6	106,3	96,8	97,8
Média	4,7	6,5	7,2	-	103,9	105,4	106,0	-	95,7	97,1
KCl quebra-lombo*	3,7				103,1				101,2	

(1) Aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de K; (2) Produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%); (3) IEA obtido em relação a fonte tradicional, KCl; * dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O

Em relação ao efeito residual das fontes no solo, não foram observadas diferenças entre os tratamentos quanto aos teores de K e Si no solo, como também não foram obtidos ajustes de

modelos de regressão significativos que demonstrassem o efeito das doses crescentes de fonolito e fonolito com KCl nos teores de K e Si do solo (Tabela 14).

Tabela 14. Teores de K (extrator resina) e Si (extrator CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$) na camada de 0-20 cm, cultivado por dois anos consecutivos com cana-de-açúcar em resposta a aplicação de doses de fonolito e fonolito com KCl.

Dose de K_2O (kg ha^{-1})	Fonolito	Fonolito com KCl	Média
	$\text{K}_{\text{resina}} \text{ no solo (cmol}_c \text{ dm}^{-3})$		
0	0,12		
60	0,15	0,13	0,14
120	0,12	0,13	0,12
240	0,13	0,16	0,14
Média	0,13 a	0,14 a	
$\text{Si}_{\text{CaCl}_2 0,01 \text{ mol L}^{-1}} \text{ no solo (mg dm}^{-3})$			
0	3,6		
60	4,4	3,9	4,2
120	4,1	4,0	4,0
240	4,0	3,9	3,9
Média	4,2 a	3,9 a	

K solo: CV: 17,2%; DMSTukey: 0,02; DMSDunnet: 0,05.

Si solo: CS: CV: 12,3%; DMSTukey: 0,4; DMSDunnet: 1,0.

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.

Considerando-se uma extração média de potássio pela cana-de-açúcar de $2,05 \text{ kg de K}_2\text{O t}^{-1}$ (Oliveira et al., 2010), e tendo sido observada uma produção acumulada média de 315 e 213 t ha^{-1} de colmo de cana para o fonolito e o fonolito com KCl respectivamente, pode-se estimar uma extração de 630 e 426 kg ha^{-1} de K_2O durante os dois ciclos de cultivo. Não houve depleção e nem o aumento dos teores de potássio no solo em resposta às doses e fontes de potássio aplicados ao solo, mesmo no caso da aplicação de 240 kg ha^{-1} de fonolito com KCl, que apresentou incremento de $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em relação à não aplicação de potássio e às demais doses do fonolito e fonolito com KCl.

No caso do silício, apesar de não terem sido observadas diferenças estatísticas, a aplicação do fonolito e do fonolito com KCl resultou em acréscimos de até $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ de Si no solo, com os melhores resultados sendo obtidos quando a menor dose do fonolito foi aplicada (Tabela 14).

Tavares et al. (2018), após cultivo de 4 cortes de *Urochloa decumbens* em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, verificaram aumento nos teores de K e Si no solo com a aplicação do fonolito. O K no solo extraído com Mehlich-1, passou de 28 para 70 mg dm^{-3} , e o Si no solo extraído com ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ passou de 2 para 15 mg kg^{-1} . Os mesmos autores também verificaram que, quando ocorreu a aplicação do fonolito de forma conjunta com

compostos orgânicos (compostado ou apenas misturado), claramente verificaram que as bioliberações totais de K e Si do fonolito são potencializadas, apresentando valores significativamente superior aos encontrados com a utilização do fonolito isoladamente. Por outro lado, Luz et al. (2013) verificaram que a aplicação de KCl proporcionou incremento significativo nos teores do solo e com o fonolito não houve alteração, após o cultivo de cana-de-açúcar 3º corte. Quando o fonolito foi adicionado no início da compostagem de torta de filtro houve tendência do incremento dos teores de K no solo.

4. CONCLUSÕES

A adubação com potássio, independentemente da fonte, proporcionou aumento da produtividade de colmos, ATR e produtividade de açúcar, tanto no efeito direto, como também para o efeito residual e no efeito acumulativo. O fonolito e o fonolito com KCl apresentaram resultados equivalentes ao KCl em relação as concentrações foliares de K, Na, Si, Cu, Fe, Mn, Zn, produtividade de colmos, açúcar total recuperável e produtividade de açúcar.

5. REFERÊNCIAS

ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Pesquisa setorial, macro indicadores**. http://anda.org.br/pesquisa_setorial/, acesso em: 29 mai. 2022.

ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Nutrição da cana de açúcar**. Piracicaba: Potafós, 1992. 40 p.

BERTHELSEN, S.; NOBLE, A.; KINGSTON, G. et al. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: **Silicon in agriculture conference**, 2., 2002, Tsuruoka. Proceedings... Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science & Plant Nutrition, 2002. 57 p.

CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in Sugarcane: Availability in Soil, Fertilization, and Uptake. **Silicon**, v. 13, p.3691–3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>.

Conselho dos Produtores de Cana-De-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado De São Paulo (CONSECANA). **Manual de instruções**. 5.ed, Piracicaba, 2006. 112p.

CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. **Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil**. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p.71-92.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.

DUARTE, I. N.; KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; SANTOS, D. S. Rochagem com o fonolito em cana planta. In: THEODORO, S. T.; MARTINS, E. S.; FERNANDES, M. M.; CARVALHO, A. M. X. (eds.) Congresso Brasileiro de Rochagem. **Anais...** Poços de Caldas-MG. p. 292-300, 2013.

EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. – Brasília, DF: Embrapa, 212 p. 2018a.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. – Brasília-DF. 356 p. 2018b.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n. 2, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. v. 32, p. 201–213, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU,2004. 34 p. (Boletim Técnico, 2).

LI, T.; WANG, H.; WANG, J.; ZHOU, Z.; ZHOU J. Exploring the potential of phyllosilicate minerals as potassium fertilizers using sodium tetraphenylboron and intensive cropping with perennial ryegrass. **Scientific Reports**. v. 5, p. 1-7, 2015. <http://doi:10.1038/srep09249>.

LUZ, P. H. de C.; PERES, C. E. B.; YASUDA, M.; FERRAZ, M. R.; CASADEI, R. A.; LUNARDI, L. J. Avaliação do desempenho do fonolito via mineral e no enriquecimento da torta de filtro em soqueira de cana-de-açúcar. In: THEODORO, S. H.; MARTINS, E. S.;

FERNANDES, M. M.; CARVALHO, A. M. X. II Congresso Brasileiro de Rochagem. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. P. 301-311. 2013.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 2006. 638 p.

MANCUSO, M. A. C. SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A. Effect of potassium sources and rates on Arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1448–1456, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>.

MANNING, D. A. C. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. **Natural Resources Research**, v.27, p. 217-227, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9347-2>.

MANNING, D. A. C.; BAPTISTA, J.; SANCHEZ LIMON, M.; BRANDT, K. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. **Sci Total Environ**. v. 1, n. 574, p. 476-481, 2017. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.086>.

MORAES NETO, S. P. de.; MARTINS, E. de S. Comparação entre adubação com cloreto de potássio e dois tipos de rochas potássicas no crescimento de *Eucalyptus urophylla*. **Agropecuária Técnica**, p. 83-91, 2020. <https://doi.org/10.25066/agrotec.v41i3-4.50775>.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; DA SILVA, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2010, v. 34, n. 4, pp. 1343-1352. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>.

PÁDUA, E. J. Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas. 91 p. **Dissertação**. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil, 2012.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. **Outras culturas industriais**. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Fundação IAC, 1997. p. 233-243. (Boletim, 100).

REIS, J. B. B. Dissolução de grãos minerais em colunas de solo. 46 p. **Dissertação**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2022.

SAVVAS, D.; NTATSI, G. Biostimulant activity of silicon in horticulture. **Scientia Horticulturae**. v. 196, p. 66-81, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2015.09.010>.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**. v. 11, p. 3733-3740, 2016. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522>.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2009. 627p.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; COSTA, C. H. M. da; GILABEL, A. P.; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Silicate rocks as an alternative potassium fertilizer for upland rice and common bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, e01411, 10 p., 2021a. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01411>.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; GILABEL, A. P.; COSTA, C. H. M. da; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Efficiency and residual effect of alternative potassium sources in grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, e02686, 10 p., 2021b. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02686>.

SYSTAT SOFTWARE. **SigmaPlot statistics user's guide**, version 11.2 ed. Systat Software, Inc., San Jose, Costa Rica, 2009.

TAVARES, L. D. F.; DE CARVALHO, A. M. X.; CAMARGO, L. G. B.; PEREIRA, S. G. D. F.; CARDOSO, I. M. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 7, n. 2, p. 89-98, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x>.

TOLEDO, F. H. S. F.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; MARIÑO, Y. A.; Biomassa aérea, transpiração e eficiência do uso da água em plantações de eucalipto fertilizadas com KCl, NaCl e

pó de rocha fonolítica. **New Forests**, v. 51, p. 469–488, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09743-8>.

TRANCHES, E. R.; SOUZA, F. R. da C.; SANTOS, A. R. dos.; SANTOS, N. B. dos.; BIANCHINI, H. C.; FLORENTINO, L. A. Use of phonolite associated with vinasse in sugarcane cultivation. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. e3311426996, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.26996>.

VAN STRAATEN, P. **Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa**. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338p. 2002.

CAPÍTULO 3 – Fonolito de Poços de Caldas como fonte alternativa de potássio para cultivo de cana soca.

RESUMO

MONTES, RAFAEL MARANGONI. Fonolito de Poços de Caldas como fonte de potássio para cultivo de cana soca.

O Brasil destaca-se como um dos maiores produtores agrícolas e conseqüentemente um dos maiores consumidores de insumos, incluindo os fertilizantes. Devido à baixa capacidade de produção nacional de fertilizantes, no ano de 2021, o país importou 85% da sua demanda, ficando exposto à oscilação dos preços do mercado internacional, como também à disponibilidade. Com o objetivo de investigar o potencial de utilização do fonolito de Poços de Caldas-MG, como fonte de potássio, foi montado um experimento a nível de campo, com cultura da cana-de-açúcar no município de Veríssimo-MG, utilizando a variedade CTC 4, em um Latossolo Vermelho distroférico com baixa concentração de potássio. O delineamento experimental constou de blocos casualizados, 2 x 3+1, com quatro repetições, utilizando-se duas fontes de potássio - fonte padrão KCl e fonolito - nas doses de 60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O, e um controle sem a aplicação de K₂O, em cana soca de segundo corte. Verificou-se que o fonolito apresentou resultados equivalentes ao KCl em relação às concentrações foliares de Na, Si, Cu, Fe, Mn e Zn. Ambas as fontes aumentaram as concentrações de K foliar no primeiro ano de avaliação, porém o KCl proporcionou maiores teores que o fonolito. No segundo corte, avaliando-se o efeito residual dos tratamentos, verificou-se aumento nas concentrações foliares de K e Fe em respostas às doses de potássio, independentemente da fonte utilizada. A adubação potássica proporcionou aumento da produtividade de colmos, açúcar total recuperável e produtividade de açúcar, tanto no efeito direto, como também para o efeito residual e no efeito acumulativo. O fonolito proporcionou incremento nas concentrações de silício e potássio no solo após 2 anos de cultivo de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: pó de rocha, remineralizador, fertilizante,

ABSTRACT

MONTES, RAFAEL MARANGONI. Phonolite from Poços de Caldas as potassium source for ratoon sugarcane.

Brazil stands out as one of the largest agricultural producers and consequently one of the largest consumers of inputs, including fertilizers. Due to the low national production capacity of fertilizers, in 2021, the country imported 85% of its demand, being exposed to fluctuations in international market prices, as well as availability. With the aim of investigating the potential use of the phonolite from Poços de Caldas-MG, as a source of potassium, an experiment was set up at field level, with sugarcane cultivation in the municipality of Veríssimo-MG, using the variety CTC 4, in a dystroferic Red Latosol with low potassium concentration. The experimental design consisted of randomized blocks, 2 x 3+1, with four replications, using two sources of potassium - standard source KCl and phonolite - at doses of 60, 120 and 240 kg ha⁻¹ of K₂O, and a control without the application of K₂O, in second-cut ratoon cane. It was verified that the phonolite presented results equivalent to KCl in relation to the foliar concentrations of Na, Si, Cu, Fe, Mn and Zn. Both sources increased leaf K concentrations in the first year of evaluation, but KCl provided higher levels than phonolite. In the second cut, evaluating the residual effect of treatments, there was an increase in K and Fe foliar concentrations in response to potassium doses, regardless of the source used. Potassium fertilization provided an increase in stalk productivity, total recoverable sugar and sugar productivity, both in the direct effect, as well as for the residual effect and the cumulative effect. The phonolite provided an increase in the concentrations of silicon and potassium in the soil after 2 years of sugarcane cultivation.

Keywords: rock dust, remineralizer, fertilizer, rock for crop

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) destaca-se como a espécie mais importantes para a produção de açúcar e bioenergia no mundo, sendo o Brasil o maior produtor, seguido de Índia e China (WU et al., 2020). Para a safra brasileira 2022/23, prevê-se produção de 596,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, um aumento de 1,9% na produção de colmos em relação à última safra. Isso representa uma redução de 1,3% na área de colheita, ocupando 8.209,3 mil hectares. Contudo, há expectativa de recuperação da produtividade em 3,2%, resultado de um clima mais favorável que o ocorrido no ciclo anterior, projetando-se uma produtividade média de 72.609 kg ha⁻¹ (CONAB, 2022).

Para manter os bons níveis de produtividade e longevidade dos canaviais, faz-se necessário o uso das mais modernas informações técnicas e melhores práticas agrícolas de manejo para a cultura, como também o emprego racional dos insumos. Dentro os insumos utilizados na cultura, os corretivos e fertilizantes são indispensáveis para o correto manejo nutricional, sendo capazes de promover melhoria da produtividade como também maior longevidade.

Devido à baixa fertilidade dos solos das principais áreas produtoras, o Brasil apresenta alta necessidade de consumo de corretivos e fertilizantes. Os corretivos são fontes que apresentam uma boa disponibilidade nacional, mas já para os fertilizantes a disponibilidade é limitada. Devido a essa situação, o Brasil é responsável por cerca de 8,5% do consumo global de fertilizantes, ocupando a quarta posição, atrás da China, da Índia e dos EUA (ANDA, 2021). No ano de 2021, mais de 85% dos fertilizantes utilizados no país foram importados, de um mercado dominado por poucos fornecedores (ANDA, 2022).

O mercado internacional de *commodities* enfrenta crises periódicas que podem significar riscos altos para a agropecuária brasileira. Eventuais choques na oferta, como o que vem ocorrendo recentemente com os fertilizantes, expõem as vulnerabilidades do Estado brasileiro de alta dependência de insumos estratégicos. Recentemente, a possibilidade de falta de fertilizantes em decorrência de sucessivas crises, sendo o conflito entre Rússia e Ucrânia a mais conhecida delas (CALIGARIS et al., 2022), expos mais ainda a vulnerabilidade brasileira, principalmente para o cloreto de potássio, insumo que é 95% importado (ANDA, 2022).

Nos últimos anos, a busca por fontes alternativas, principalmente de potássio, tem se intensificado. A ciência vem tentando identificar fontes alternativas de nutrientes que possam ser utilizadas na agricultura, para alcançar o suprimento e uso eficiente e sustentável de nutrientes para a agricultura brasileira. Os remineralizadores, também conhecidos como pó de rocha ou

agrominerais silicáticos, têm sido os materiais mais testados, devido à abundância desse tipo de material no território brasileiro.

Apesar de existir uma legislação que regulamenta a utilização desses tipos de materiais na agricultura, através da Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016 do Ministério da Agricultura Pecuária Abastecimento (BRASIL, 2016), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), posicionou-se oficialmente sobre esse tema, informando que, atualmente, não há informação científica suficiente para se recomendar agrominerais silicáticos como fonte de nutrientes, sobretudo, de potássio, ou condicionadores de solos para a agricultura (EMBRAPA, 2020).

Este fato está associado à relativa escassez de informações científicas sobre as diversas rochas apontadas como potenciais para essa utilização. Dessa forma, a pesquisa tem papel fundamental na caracterização e entendimento do potencial de utilização desses diversos insumos. Esses estudos, todavia, são complexos, dada a grande diversidade, quantidade e variabilidade desses materiais.

Dentre as rochas que apresentam um bom histórico de pesquisa estão aquelas portadoras de potássio localizadas no planalto de Poços de Caldas-MG. Os primeiros trabalhos com esses materiais foram iniciados na década de 50, utilizando cultura da batata-inglesa (BOOK et al., 1960), algodão (NEVES et al., 1960) e arroz (CATANI & GALLO, 1960), e mais recentemente, a cultura da cana-de-açúcar (LUZ et al., 2013; DUARTE et al., 2013), soja, milho, feijão e arroz (SORATTO et al., 2021a; SORATTO et al., 2021b), eucalipto (MORAES NETO & MARTINS, 2020; TOLEDO et al., 2020) e cafeeiro (MANCUSO et al., 2014). Esses estudos são de grande importância para nortear os passos que devem ser trilhados para uma melhor eficiência de utilização desses materiais nas diversas culturas.

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo estudar o efeito do fonolito de Poços de Caldas, em comparação com a fonte padrão KCl, na implantação e na manutenção de cultivo de cana-de-açúcar, como também seu efeito residual.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Um experimento de campo foi conduzido no município de Veríssimo, no Estado de Minas Gerais, Brasil (19°46'29.6"S 48°22'21.6"W, na altitude de 641 m), em área de produção da Usina Santo Ângelo, anteriormente cultivada com pastagem do gênero braquiária, utilizando a cultura da cana-de-açúcar, variedade CTC 4, ambiente de produção D, nas safras 2019/2020 e 2020/2021.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região do experimento é Cwa. Os dados climáticos registrados durante o experimento são mostrados na Figura 1.

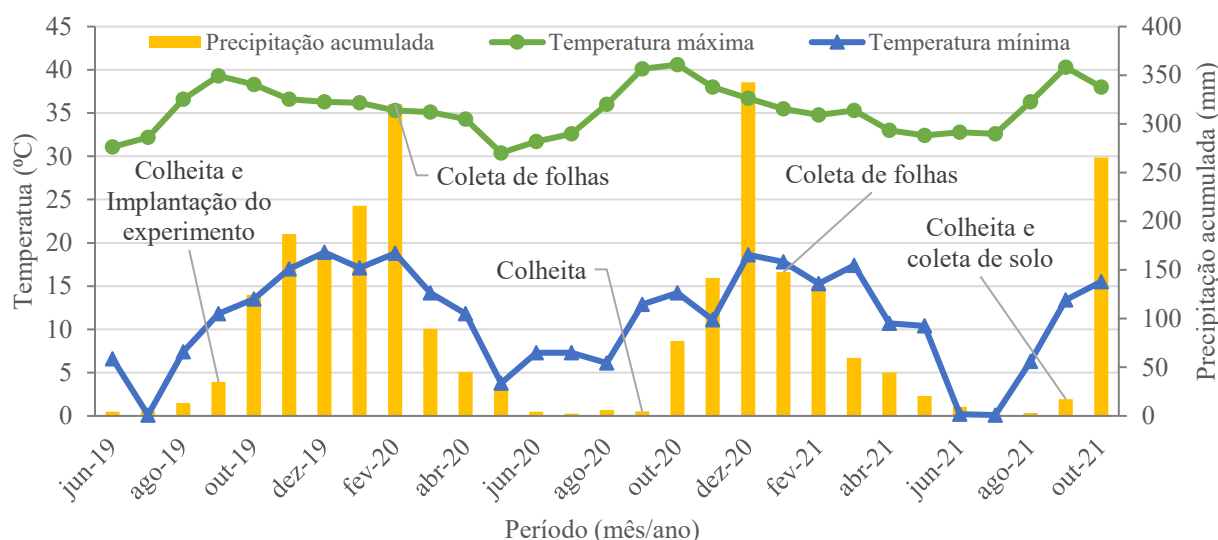


Figura 1. Precipitação mensal e temperaturas médias, de fevereiro de 2019 a outubro de 2021, da região da área experimental. Dados fornecidos pelo Usina Santo Ângelo, localizada no município de Pirajuba, no Estado de Minas Gerais, Brasil.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 2018). A caracterização química, física e mineralógica do solo é apresentada nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Caracterização química do solo da área da área experimental.

Prof. (cm)	M.O. dag kg ⁻¹	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	Si	K	Ca	Mg	Al	H+Al cmol _c dm ⁻³	SB	T	V - % -	m
0-20	2,6	5,7	3,8	4,1	0,07	3,7	0,7	0,0	1,9	4,49	6,39	70	0
20-40	1,7	5,4	0,8	3,3	0,05	1,7	0,3	0,1	2,0	2,07	4,07	51	5
80-120	0,8	5,1	0,7	-	0,04	0,6	0,1	0,2	1,8	0,67	2,47	27	23

pH: CaCl₂; P, K resina; Al, Ca, Mg: KCl 1 mol L⁻¹; SB: soma de bases; T: CTC a pH 7; V: saturação por bases, m: saturação por alumínio (SILVA, 2009) e Si: CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (Korndörfer et al., 2004)

Tabela 2. Análise física e mineralógica da área experimental.

Prof. (cm)	Areia %	Silte %	Argila %	Mineralogia*
0-20	47,5	10,0	42,5	Quartzo (SiO ₂), Gibbsita (Al(OH) ₃), Magnetita
20-40	25,0	15,0	60,0	(Fe ₃ O ₄), Hematita (Fe ₂ O ₃), Anatásio (TiO ₂),
80-120	27,5	17,5	55,0	Ilmenita (FeTiO ₃) e Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)

*procedimento realizado por meio da difratometria de raios X (DRX) na unidade de pesquisa do campo do meio do Grupo Curimbaba, Poços de Caldas-MG

Utilizou-se delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), 2 x 3+1, com quatro repetições, o qual constou de duas fontes de potássio - fonte padrão KCl e fonolito de Poços de Caldas-MG (comercializado pela Yoorin® Fertilizantes com o nome de Ekosil®) -, nas doses de

60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O, e um controle sem a aplicação de K₂O. Na tabela 3 são apresentadas as garantias e especificações granulométricas das fontes utilizadas.

Tabela 3. Garantias e especificações granulométricas das fontes utilizadas no experimento.

Fonte	K ₂ O total	K ₂ O sol. a.c.2%	K ₂ O sol. água	Si total	Especificação granulométrica
Fonolito *	8	1	-	25	Pó**
KCl	-	-	60	-	Granulado

* teores totais dos macronutrientes secundários e micronutrientes existentes naturalmente no produto: Ca= 1%; Mg =0,15%; Na₂O =7,0%; B =0,007%; Co= 0,0004%; Mn= 0,15%; Mo = 0,0015% e Zn= 0,002% (p/p); **passante 100% na peneira de 50 mesh (<0,297mm), passante 99% na peneira de 100 mesh (<0,149mm), passante 87% na peneira de 200 mesh (<0,74mm) e passante 58% na peneira de 635 mesh (<0,02mm).

As parcelas foram constituídas por 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si. A área de cultivo de cada parcela foi de 75 m², sendo que, entre cada uma das parcelas, adotou-se ainda um espaçamento de 2 m nas cabeceiras. Os tratamentos foram aplicados de forma manual no dia 30 de setembro de 2019 em soqueira de 2º corte (cana queimada colhida mecanicamente) (primeiro corte realizado em 23 de setembro de 2019) (Figura 2). O fonolito foi aplicado em área total enquanto que o KCl foi aplicado em uma faixa de aproximadamente 60 cm sobre a linha de brotação da soqueira, sem reaplicação dos tratamentos após o corte.

No mesmo dia da aplicação dos tratamentos foi realizada a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), utilizando o nitrato de amônio (33% de N), e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, utilizando o superfosfato triplo (44% de P₂O₅), aplicados em uma faixa de aproximadamente 60 cm sobre a linha de brotação da soqueira, sendo essa adubação realizada novamente após o primeiro corte.



Figura 2. Imagem mostrando os tratamentos aplicados após a instalação do experimento.

Aos 144 DAA (02/20 – 2º corte) e aos 486 DAA (01/21 – 3º corte), foram coletadas amostras de folhas para análise dos teores de potássio (K), sódio (Na), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e silício (Si) seguindo metodologias propostas por Silva (2009) e Korndörfer et al. (2004) (análise de Si). Assim, coletaram-se duas folhas (TVD - Top Visible Dewlap) de cada uma das 5 linhas da parcela. A TVD é definida como a primeira folha com a lígula visível, da qual foi retirado o terço médio e a nervura central para a posterior análise laboratorial.

Aos 361 DAA (09/20 – 2º corte) e aos 718 DAA (09/21 – 3º corte), realizou-se a colheita manual da cana-de-açúcar de 3 metros lineares das três linhas centrais de cada parcela, totalizando uma área de colheita de 9 metros lineares por parcela. Após o desponte e a retirada do excesso de palha, a pesagem da cana colhida foi realizada com o auxílio de uma balança acoplada a um tripé de sustentação. A produtividade de colmos por hectare (TCH) foi determinada convertendo-se os pesos obtidos por parcela para $t\ ha^{-1}$.

Para a realização das análises de qualidade da matéria-prima, foram amostrados, no momento das colheitas, 8 colmos seguidos da linha central da parcela. Em seguida, os materiais obtidos foram submetidos à análise tecnológica no laboratório da Usina Santo Ângelo, seguindo-se metodologia proposta por CONSECANA (2006). Determinou-se o açúcar total recuperável (ATR em kg t^{-1}), o qual foi usado também para o cálculo da produção de açúcar por hectare (TAH em t ha^{-1}), multiplicando-o pelo TCH. Também no momento das colheitas, foi avaliada, aleatoriamente, a altura dos colmos (m) de 3 plantas de cada parcela através medição do ponto de corte ao ponto de quebra.

Após o 3º corte (730 DAA – 09/21), foram coletadas amostras de solo, coletando-se três amostras por parcela na linha e na entrelinha da cana-de-açúcar, para análise dos teores de K (extrator resina) e Si disponível seguindo-se metodologias propostas por Silva (2009) e Korndörfer et al. (2004), respectivamente.

Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando-se o programa ASSISTAT versão 7.6. beta (SILVA; AZEVEDO, 2016), sendo as médias comparadas pelos testes de Tukey e Dunnet (comparação com o controle e com tratamento com KCl no quebra-lombo), ambos a 0,05 de significância. Para a variável dose, realizou-se análise de regressão com auxílio dos programas estatísticos Sisvar (versão 5.3) (FERREIRA, 2014) e SigmaPlot (versão 11.0) (SYSTAT SOFTWARE, 2009) a 0,1 de significância.

Independentemente de ter ocorrido uma interação entre as fontes e doses das fontes de potássio, foram calculados o aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de potássio, a produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%), e o índice de eficiência agrônômica (IEA), calculado como a razão percentual entre os rendimentos resultantes das fontes K aplicadas na mesma dose. A rendimento obtido no tratamento sem aplicação de K foi subtraído de ambos os rendimentos, como segue: $\text{IEA (\%)} = (X1/X2) \times 100$, onde X1 é rendimento com uma fonte alternativa (fonolito) na dose correspondente; e X2 é o rendimento com a fonte tradicional (KCl) na dose correspondente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 4 são apresentados os teores foliares de K, Si, Na, Cu, Fe, Mn e Zn no 2º e 3º corte. Para os teores de potássio, quando a maior dose de K_2O foi aplicada (240 kg ha^{-1} de K_2O), maiores teores foliares de K na soqueira de 2º corte foram obtidos no tratamento que recebeu o KCl, com acréscimos de 2,9 e 3,5 em relação ao fonolito, aplicado nesta mesma dose, e ao controle, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados quanto ao Fe foliar, cujos maiores

teores médios foram obtidos nos tratamentos que receberam o KCl (Tabela 4). Os teores foliares de potássio dos tratamentos com o fonolito ficaram abaixo da faixa considerada adequada para a cana-de-açúcar, de 10 a 16 g kg⁻¹ (RAIJ, 1997)

Por outro lado, foi verificada diferença significativa para os teores médios de Si foliar com a aplicação do fonolito, com ganhos de 2,1 g kg⁻¹ em relação ao KCl (Tabela 5). Quanto ao Na, nota-se que apesar de não terem sido detectadas diferenças estatísticas, a aplicação do fonolito resultou em decréscimos de 2,1 g kg⁻¹ nos teores médios deste elemento quando comparado ao KCl (Tabela 4).

Não foram observadas diferenças entre os tratamentos quanto aos teores foliares de Na, Cu, Mn e Zn no primeiro ano (2º corte) de avaliação dos tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4. Teores de K, Si, Na, Cu, Fe, Mn e Zn em folhas da cana soca no 2º corte, em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média
	K foliar (2º corte) (g kg ⁻¹)		
0	8,8		
60	9,8 a	10,0 a	9,9
120	9,8 a	10,6 a*	10,2
240	9,4 b	12,3 a*	10,8
Média	9,6	11,0	
	Na foliar (2º corte) (g kg ⁻¹)		
0	22,0		
60	21,7	21,7	21,7
120	20,3	24,8	22,5
240	22,0	23,7	22,8
Média	21,3 a	23,4 a	
	Si foliar (2º corte) (g kg ⁻¹)		
0	21,1		
60	22,2	20,0	21,1
120	23,6	20,4	22,0
240	20,9	20,1	20,5
Média	22,2 a	20,1 b	
	Cu foliar (2º corte) (mg kg ⁻¹)		
0	10,2		
60	10,6	11,1	10,9
120	11,9	9,5	10,7
240	9,6	9,9	9,8
Média	10,7 a	10,2 a	
	Fe foliar (2º corte) (mg kg ⁻¹)		
0	81,0		
60	82,8	79,3	81,0
120	73,3	84,3	78,8
240	68,3	83,3	75,8
Média	74,8 b	82,3 a	

Mn foliar (2º corte) (g kg⁻¹)			
0	56,0		
60	60,5	69,5	65,0
120	66,0	64,0	65,0
240	64,3	61,5	62,9
Média	63,6 a	65,0 a	
Zn foliar (2º corte) (g kg⁻¹)			
0	20,1		
60	19,0	19,9	19,4
120	21,2	18,4	19,8
240	20,4	18,2	19,3
Média	20,2 a	18,8 a	

K: CV: 8,0%; DMSTukey: 1,2; DMSDunnet: 1,6. Na: CV: 16,5%; DMSTukey: 3,2; DMSDunnet: 7,4. Si: CV: 9,1%; DMSTukey: 1,6; DMSDunnet: 3,8. Cu: CV: 13,5%; DMSTukey: 1,2; DMSDunnet: 2,8. Fe: CV: 11,1%; DMSTukey: 7,5; DMSDunnet: 17,5. Mn: CV: 13,9%; DMSTukey: 7,5; DMSDunnet: 17,5. Zn: CV: 11,9%; DMSTukey: 2,0; DMSDunnet: 4,7.

Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.

Após o 2º ano de avaliações (3º corte), nota-se que, assim como observado no ano anterior, maior teor médio de K foliar foi observado com a aplicação do KCl nas doses de 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O, com ganhos de 0,5 g kg⁻¹ em relação ao tratamento controle (Tabela 5). Entretanto, pode-se ressaltar que a aplicação da maior dose de fonolito resultou em teor superior ao controle (presença do *), com acréscimos de 1,3 g kg⁻¹ de K (Tabela 5). Verificou-se que os teores médios de KCl foram superiores ao do fonolito. Quanto ao Si, maiores teores do elemento foram observados quando a maior dose de fonolito foi aplicada (240 kg ha⁻¹ de K₂O), com ganhos de 6,5 g kg⁻¹ de Si em relação ao KCl aplicado nesta mesma dose (Tabela 5).

Não foram observadas diferenças entre os tratamentos quanto aos teores foliares de micronutrientes na soqueira de 3º corte (Tabela 5). Além disso, os teores foliares de Na ficaram abaixo do limite de detecção do método analítico, não sendo possível avaliar este elemento.

Tabela 5. Teores de K, Si, Na, Cu, Fe, Mn e Zn em folhas da cana soca no 3º corte, em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média
	K foliar (3º corte) (g kg ⁻¹)		
0	12,0		
60	12,3	13,0	12,6
120	12,8	13,5*	13,1
240	13,3*	13,5*	13,4
Média	12,8 b	13,3 a	
	Si foliar (3º corte) (g kg ⁻¹)		
0	11,6		
60	9,0 a	8,7 a	8,8
120	9,3 a	8,8 a	9,1
240	13,4 a	6,9 b	10,2
Média	10,6	8,1	
	Cu foliar (3º corte) (mg kg ⁻¹)		
0	6,8		
60	7,8	7,7	7,7
120	7,3	7,0	7,1
240	7,3	6,8	7,0
Média	7,4 a	7,1 a	
	Fe foliar (3º corte) (mg kg ⁻¹)		
0	177,5		
60	200,7	185,3	193,0
120	200,7	189,0	194,8
240	194,7	187,3	191,0
Média	198,7 a	187,2 a	
	Mn foliar (3º corte) (g kg ⁻¹)		
0	74,0		
60	78,0	76,8	77,4
120	78,7	69,0	73,8
240	74,3	70,0	72,1
Média	77,0 a	71,9 a	
	Zn foliar (3º corte) (g kg ⁻¹)		
0	15,5		
60	16,0	16,8	16,4
120	16,8	17,5	17,1
240	16,0	15,7	15,8
Média	16,3 a	16,6 a	

K: CV: 5,0%; DMSTukey: 0,6; DMSDunnet: 1,3. Si: CV: 27,6%; DMSTukey: 4,0; DMSDunnet: 35,3. Cu: CV: 13,5%; DMSTukey: 1,2; DMSDunnet: 2,8. Fe: CV: 7,5%; DMSTukey: 12,2; DMSDunnet: 28,5. Mn: CV: 11,7%; DMSTukey: 7,5; DMSDunnet: 17,5. Zn: CV: 12,4%; DMSTukey: 1,7; DMSDunnet: 4,0.
Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.

A aplicação das doses crescentes de K_2O via fonolito resultou em modelo polinomial quadrático quanto aos teores foliares de K na soqueira de 2º corte, cujos melhores resultados foram obtidos na dose de 140 kg ha^{-1} de K_2O (ponto máximo da curva) (Figura 3a). Quanto ao KCl, acréscimos lineares de $0,014 \text{ g kg}^{-1}$ são obtidos a cada 1 kg ha^{-1} de K_2O adicionado através desta fonte (Figura 3a).

Não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos que demonstrassem o efeito das doses crescentes de fonolito e KCl nos teores foliares de Na, Si, Fe, Cu, Mn e Zn na soqueira de 2º corte (Figura 3).

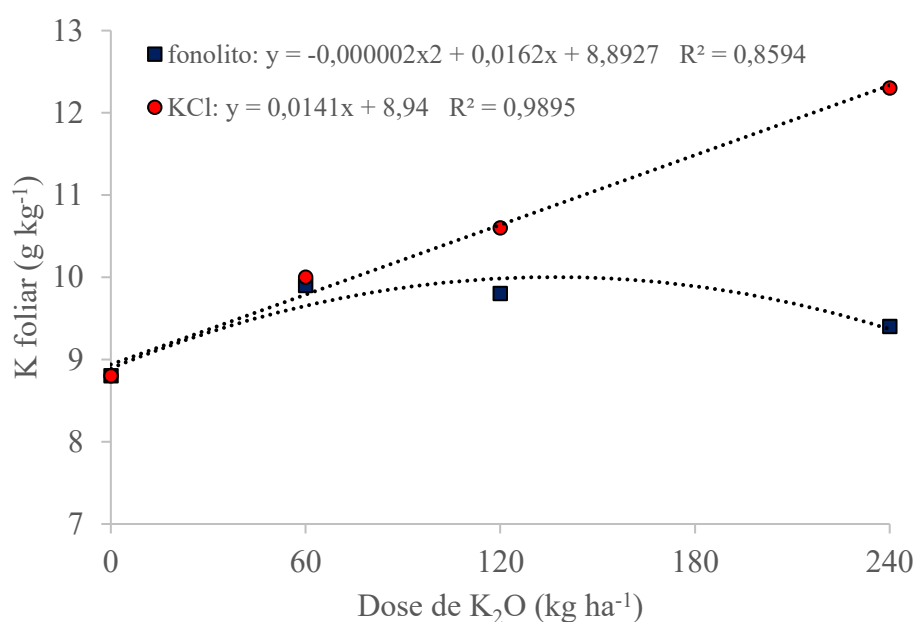


Figura 3. Teores de K em folhas da cana soca em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl na soqueira do 3º corte.

Na soqueira de 3º corte (2º ano de avaliações), modelos significativos foram obtidos somente quanto aos teores de K e Fe, apesar de não existir interação entre as fontes e as doses. Dessa forma, ao se avaliarem as médias dos dois produtos, modelos polinomiais quadráticos foram obtidos, com maiores teores de K e Fe sendo observados nas doses de 220 e 150 kg ha^{-1} de K_2O , respectivamente (ponto máximo das curvas) (Figuras 4a e 4d).

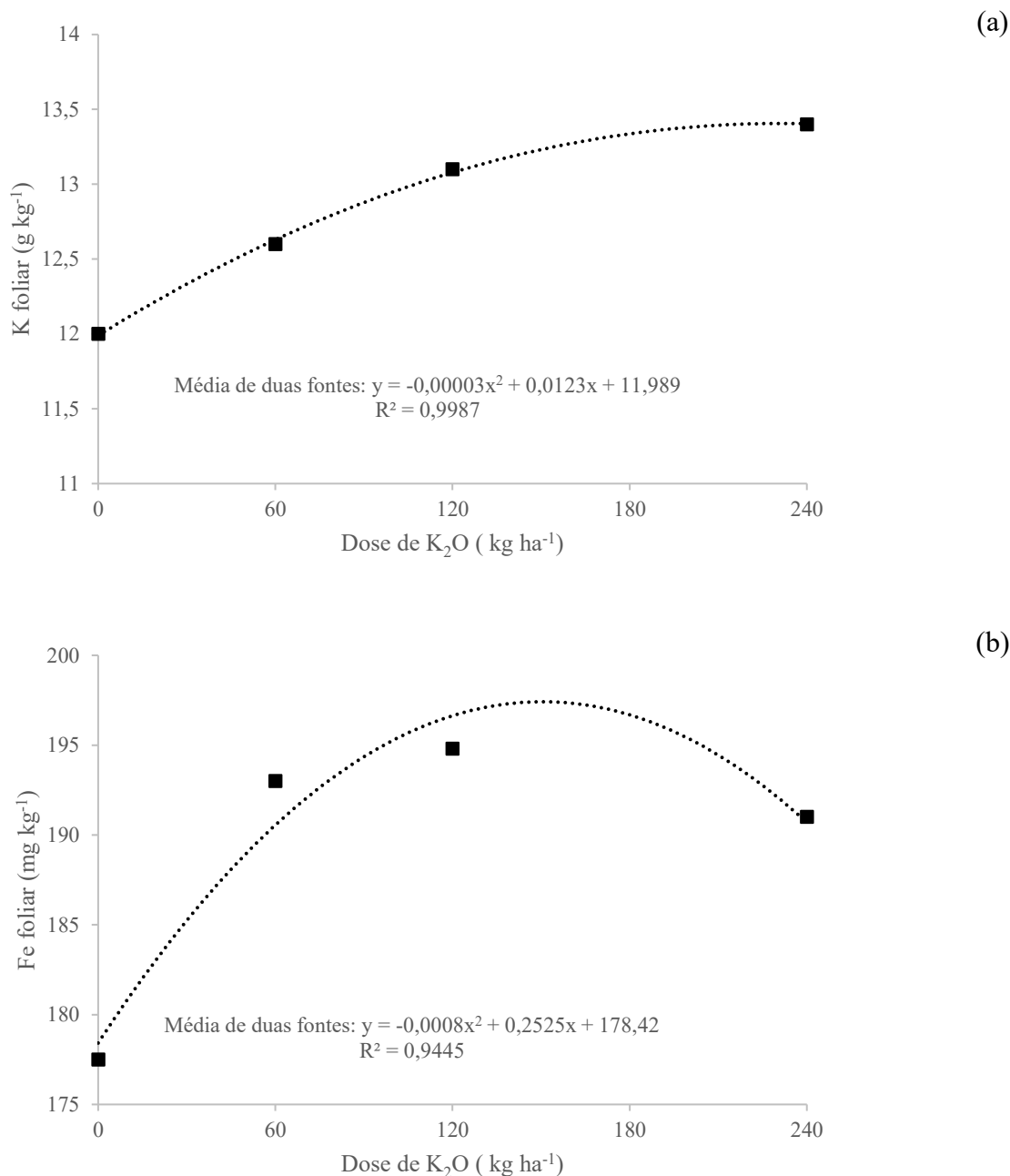


Figura 4. Teores de K (a) e Fe (b) em folhas da cana soca em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl no 3º corte da soqueira.

Em relação a produtividades de colmos (TCH) não foram observadas diferenças significativas para o 2º corte e para o acumulado, porem para o 3º corte, quando utilizado o KCl nas doses de 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O, foram significativamente superiores ao tratamento controle (Tabela 6).

Tabela 6. Produtividade de colmos (TCH) do 2º e 3º corte da cana soca e valores acumulados dos dois cortes, em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média
	TCH 2º corte (t ha ⁻¹)		
0	83,9		
60	94,7	96,7	95,7
120	102,6	90,6	96,6
240	94,7	90,4	92,5
Média	97,3 a	92,5 a	
	TCH 3º corte (t ha ⁻¹)		
0	38,6		
60	42,0	44,1	43,0
120	41,7	45,9*	43,8
240	40,7	47,6*	44,1
Média	41,4 b	45,9 a	
	TCH acumulado (t ha ⁻¹)		
0	122,5		
60	136,7	140,8	138,7
120	144,3	136,5	140,4
240	135,4	138,0	136,7
Média	138,8 a	138,4 a	

2º corte: DMSDunnet: 26,3. DMSTukey: 11,3. CV: 14,1%. 3º corte: DMSDunnet: 5,7. DMSTukey: 2,4. CV: 6,6%. Acumulado: DMSDunnet: 26,2. DMSTukey: 11,2. CV: 9,6%.

Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. * Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Em relação a produtividades de açúcar (TAH) não foram observadas diferenças significativas para o 2º corte. Para o 3º corte, as médias das doses de KCl foram significativamente superiores à média das doses do fonolito, e as doses de 60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de K₂O quando utilizado o KCl e a dose 60 kg ha⁻¹ de K₂O quando utilizado o fonolito, foram significativamente superiores ao tratamento controle (presença do *). Na produtividade acumulada de açúcar, o fonolito na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O foi superior ao tratamento controle (presença do *) (Tabela 7).

Tabela 7. Produtividade de açúcar (TAH) do 2º e 3º corte de cana soca e valores acumulados dos dois cortes, em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média
	TAH 2º corte (t ha ⁻¹)		
0	14,1		
60	17,1	17,7	17,4
120	19,0	16,5	17,8
240	16,4	15,5	15,9
Média	17,5 a	16,6 a	
	TAH 3º corte (t ha ⁻¹)		
0	6,2		
60	7,3*	7,2*	7,3
120	7,1	7,6*	7,3
240	6,6	7,8*	7,2
Média	7,0 b	7,5 a	
	TAH acumulado (t ha ⁻¹)		
0	20,3		
60	24,3	24,9	24,6
120	26,1*	24,1	25,1
240	23,0	23,3	23,1
Média	24,5 a	24,1 a	

2º corte: DMSDunnet: 5,40 DMSTukey: 2,1. CV: 15,0%. 3º corte: DMSDunnet: 0,9. DMSTukey: 0,4. CV: 6,5%.

Acumulado: DMSDunnet: 5,0. DMSTukey: 2,1. CV: 10,5%.

Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. * Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

A aplicação do fonolito no 2º corte, na dose de 120 Kg ha⁻¹ de K₂O, resultou em valores de ATR superiores ao controle (presença do *), com acréscimos de até 17,3 kg t⁻¹, e nas doses de 60 e de 120 Kg ha⁻¹ de K₂O utilizando o KCl, resultou em valores superiores ao controle (presença do *), com acréscimos de até 14,9 e 14,3 kg t⁻¹ respectivamente (Tabela 8). No 3º corte, a aplicação de fonolito na dose de 60 Kg ha⁻¹ de K₂O resultou em valor superior ao controle (presença do *), com acréscimos de 13,5 kg t⁻¹ (Tabela 8).

Ao avaliar as médias dos dois cortes, valores superiores ao controle foram obtidos com as duas menores doses de fonolito e KCl (60 e 120 kg ha⁻¹ de K₂O), com ganhos de até 13,4 kg t⁻¹ (Tabela 8).

Tabela 8. Açúcar total recuperável (ATR) do 2º e 3º corte da cana soca e valores médios dos dois cortes em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média
ATR 2º corte (kg t⁻¹)			
0	168,3		
60	179,3	183,2*	181,2
120	185,6*	182,6*	184,1
240	172,3	171,9	172,1
Média	179,0 a	179,2 a	
ATR 3º corte (kg t⁻¹)			
0	159,9		
60	173,4*	164,1	168,7
120	169,4	165,6	167,5
240	162,6	163,2	162,9
Média	168,5 a	164,3 a	
ATR médio (kg t⁻¹)			
0	164,1		
60	176,3*	173,7*	175,0
120	177,5*	174,1*	175,8
240	167,4	167,6	167,5
Média	173,7 a	171,8 a	

2º corte: DMSDunnet: 12,8. DMSTukey: 5,5. CV: 3,6%. **3º corte:** DMSDunnet: 9,7 DMSTukey: 4,1. CV: 2,9%.

Médio: DMSDunnet: 8,6. DMSTukey: 3,7. CV: 2,5%.

Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. * Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Como não houve interação significativa entre as fontes e as doses, os modelos de regressão para a produtividade e a qualidade da matéria-prima da cana soca foram obtidos com as médias dos valores das duas fontes. Dessa forma, ajustes polinomiais quadráticos foram observados, com maiores valores de TCH sendo observados na cana de 2º corte, 3º corte e no acumulado dos dois cortes para as doses de 143, 173 e 152 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente (ponto máximo das curvas) (Figuras 5a, 6a e 7a). Quanto ao TAH, melhores resultados após o 1º ano de avaliações e no acumulado dos dois anos foram observados na dose de aproximadamente 140 kg ha⁻¹ de K₂O (Figuras 5b e 7b), enquanto que, após o 2º ano, o ponto de máxima produtividade correspondeu à aplicação de 167 kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 6b).

De modo geral, maiores valores de ATR em ambos os cortes foram obtidos na dose de aproximadamente 130 kg ha⁻¹ de K₂O (Figuras 5c, 6c e 7c).

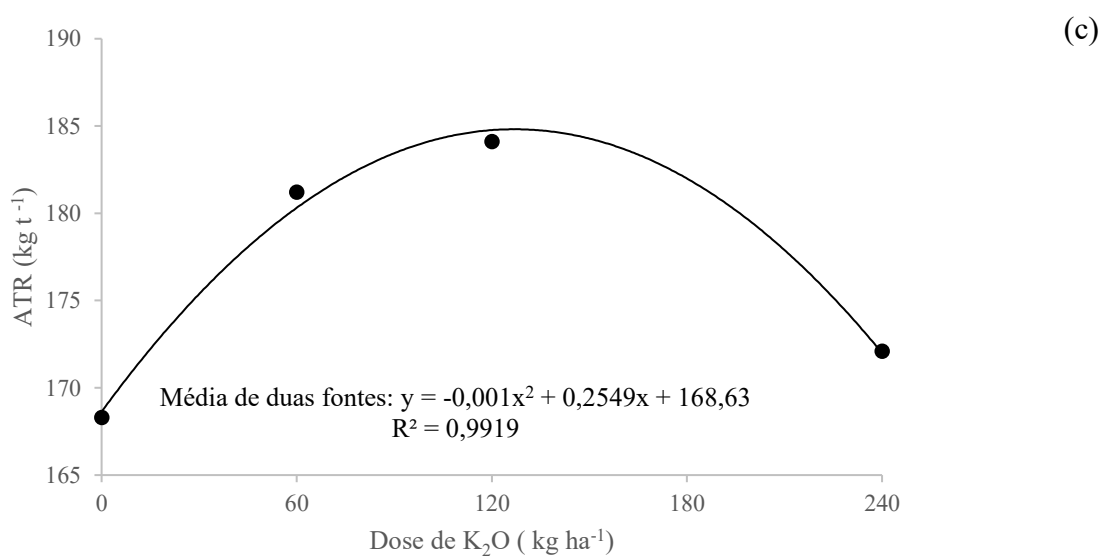
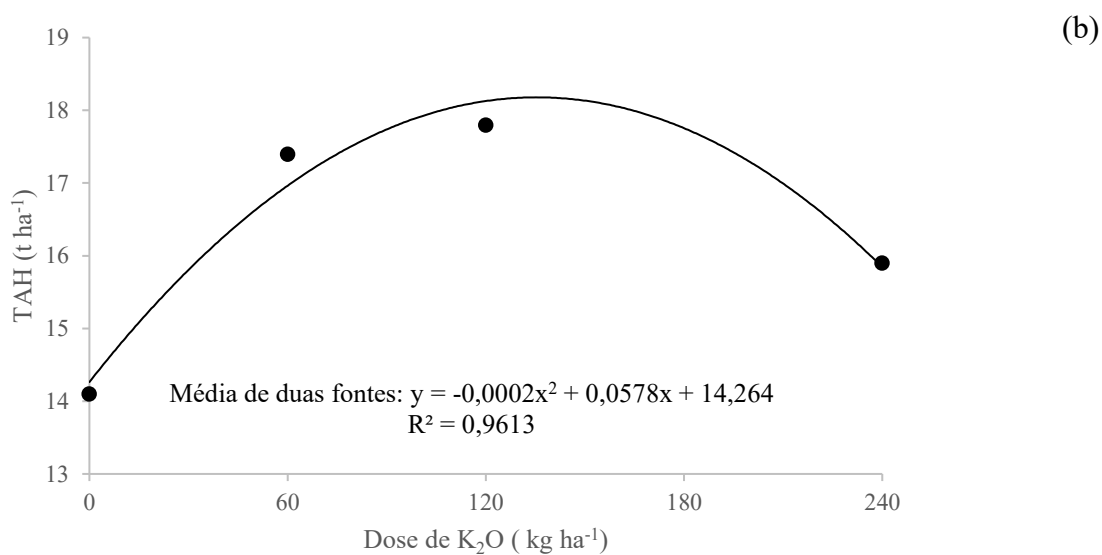
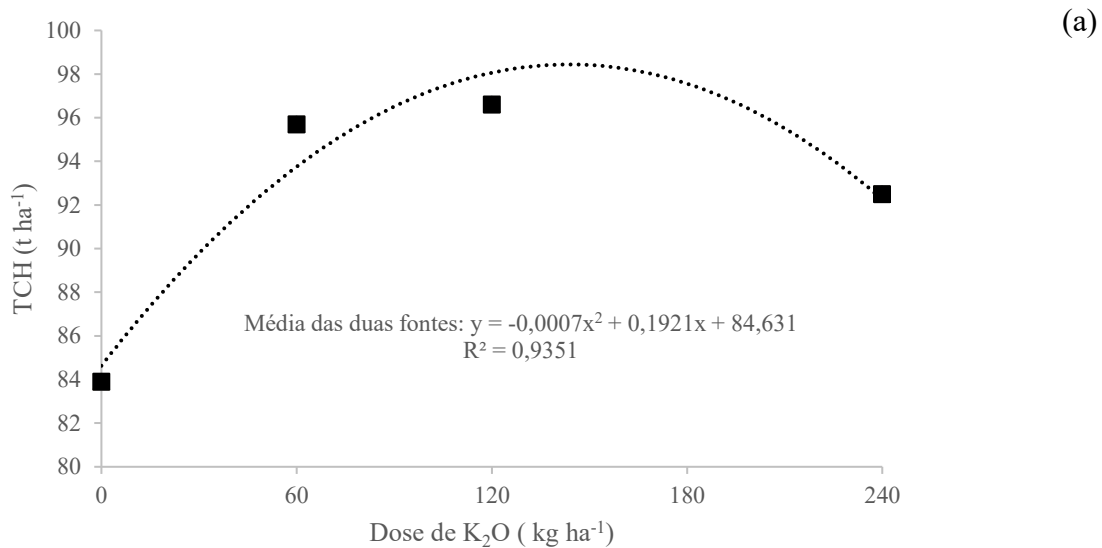


Figura 5. Produtividade de colmos (TCH) (a), de açúcar (TAH) (b) e açúcar total recuperável (ATR) (c) do 2º corte de cana soca em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl.

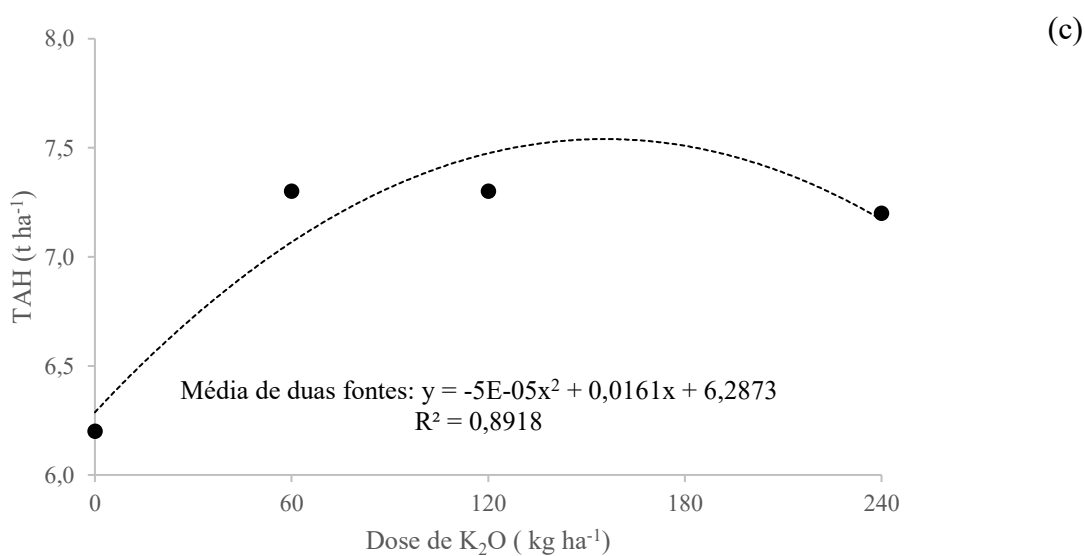
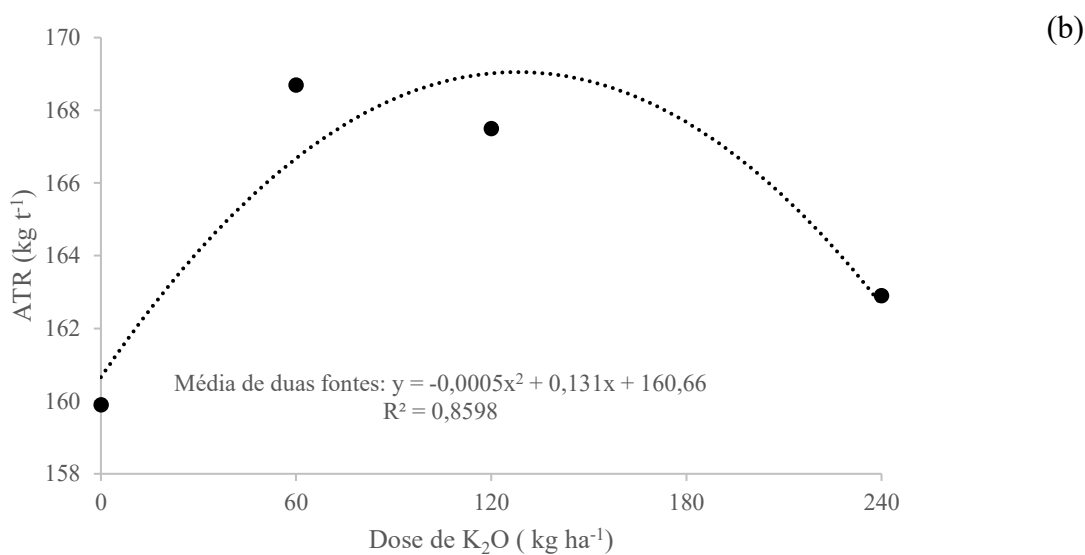
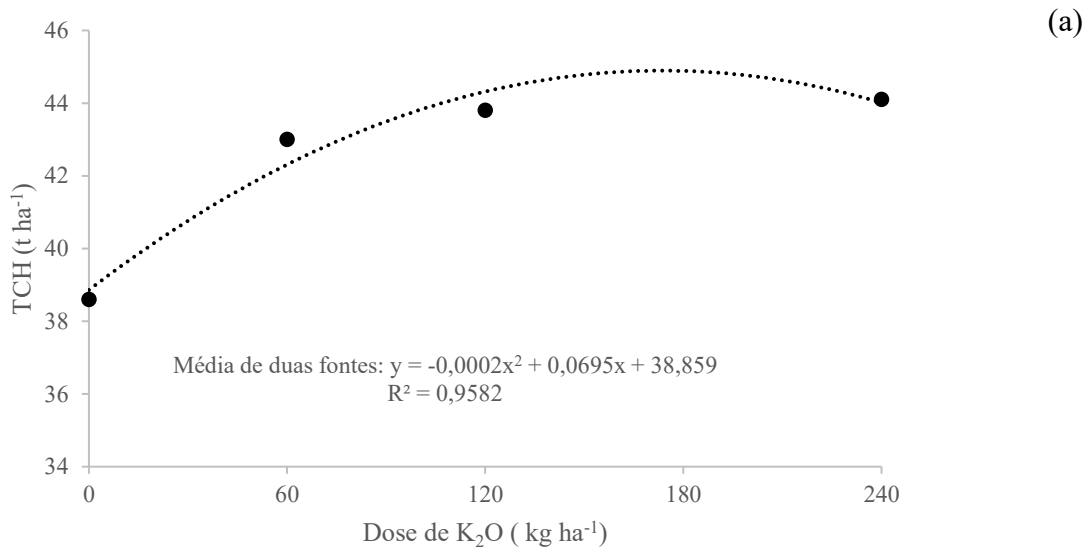


Figura 6. Produtividade de colmos (TCH) (a), açúcar (TAH) (b) e açúcar total recuperável (ATR) (c) do 3º corte de cana soca em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl na soqueira.

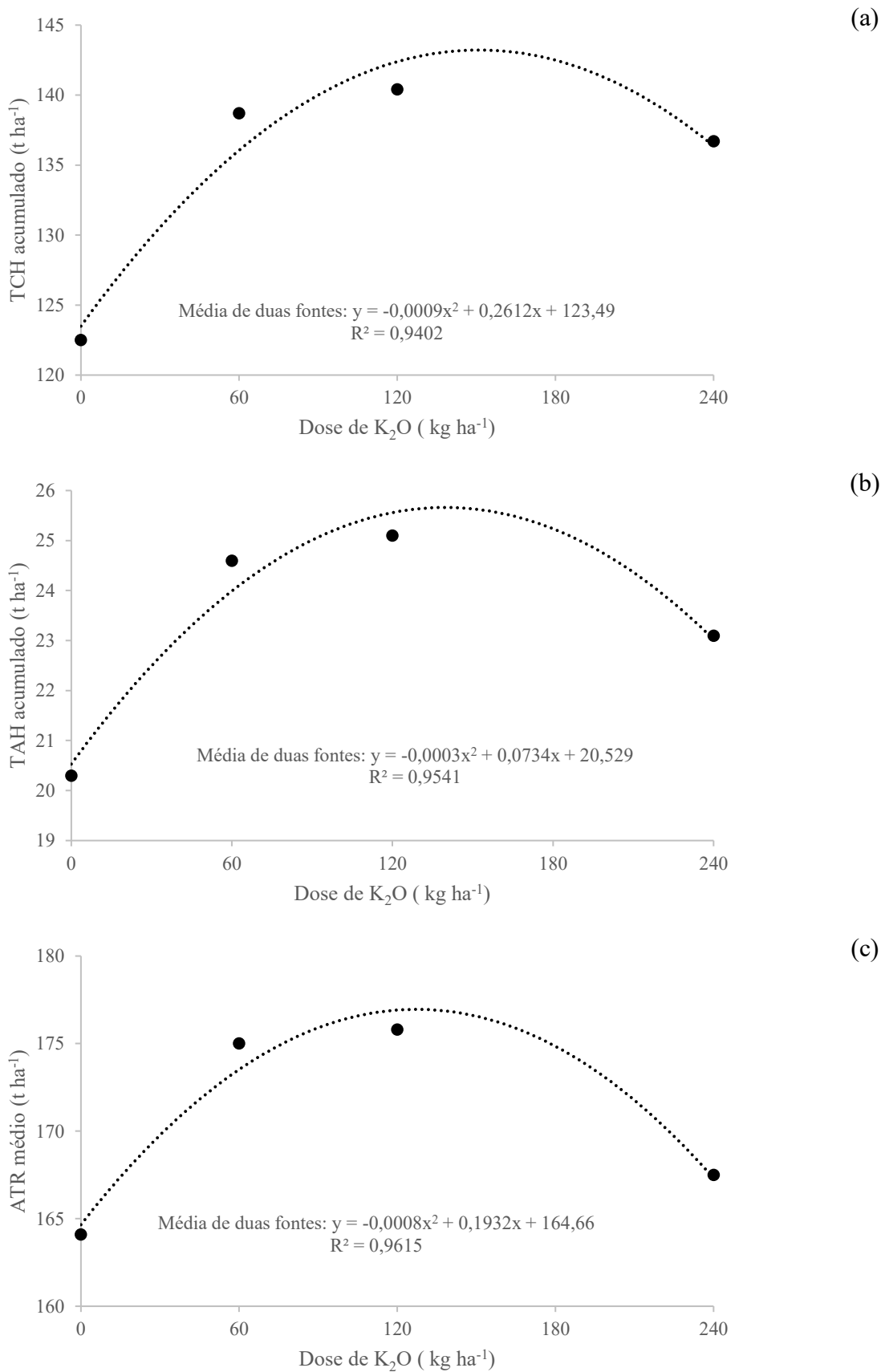


Figura 7. Valores acumulados de produtividade de colmos (TCH) (a), açúcar (TAH) (b) e valores médios de açúcar total recuperável (ATR) (c) do 2º e 3º corte, em resposta da aplicação de doses de fonolito e KCl em soqueira.

Com relação ao efeito sobre a altura de plantas, verificou-se que a aplicação do KCl resultou em maiores valores de altura de plantas da cana soca de 2º corte em comparação ao fonolito, quando ambas as fontes foram aplicadas na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O e também em relação ao tratamento controle, com acréscimos de 30 cm (Tabela 9). Por outro lado, não foram observadas diferenças entre os tratamentos quanto aos valores de altura de plantas da soqueira de 3º corte (Tabela 9).

Tabela 9. Altura de plantas da cana soca, 2º e 3º corte, em resposta a aplicação de doses de fonolito e KCl.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média
	Altura de plantas (2º corte) (m)		
0	2,3		
60	2,4 a	2,4 a	2,4
120	2,3 a	2,4 a	2,4
240	2,3 b	2,6 a*	2,5
Média	2,4	2,5	
Altura de plantas (3º corte) (m)			
0	1,3		
60	1,5	1,5	1,5
120	1,4	1,5	1,5
240	1,4	1,5	1,5
Média	1,5 a	1,5 a	

2º corte: CV: 4,8%; DMSTukey: 0,2; DMSDunnet: 0,2. 3º corte: CV: 8,0%; DMSTukey: 0,1; DMSDunnet: 0,2.

Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.

* Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos que demonstrassem o efeito das doses crescentes de fonolito na altura de plantas de cana soca de 2º corte (Figura 8a). Quanto ao KCl, acréscimos lineares de 0,13 cm são obtidos a cada 1 kg ha⁻¹ de K₂O adicionado através desta fonte (Figura 8a).

No 2º ano de avaliações, ajuste polinomial quadrático foi obtido ao se avaliarem as médias das duas fontes, com melhores resultados sendo obtidos na dose de 150 kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 8b).

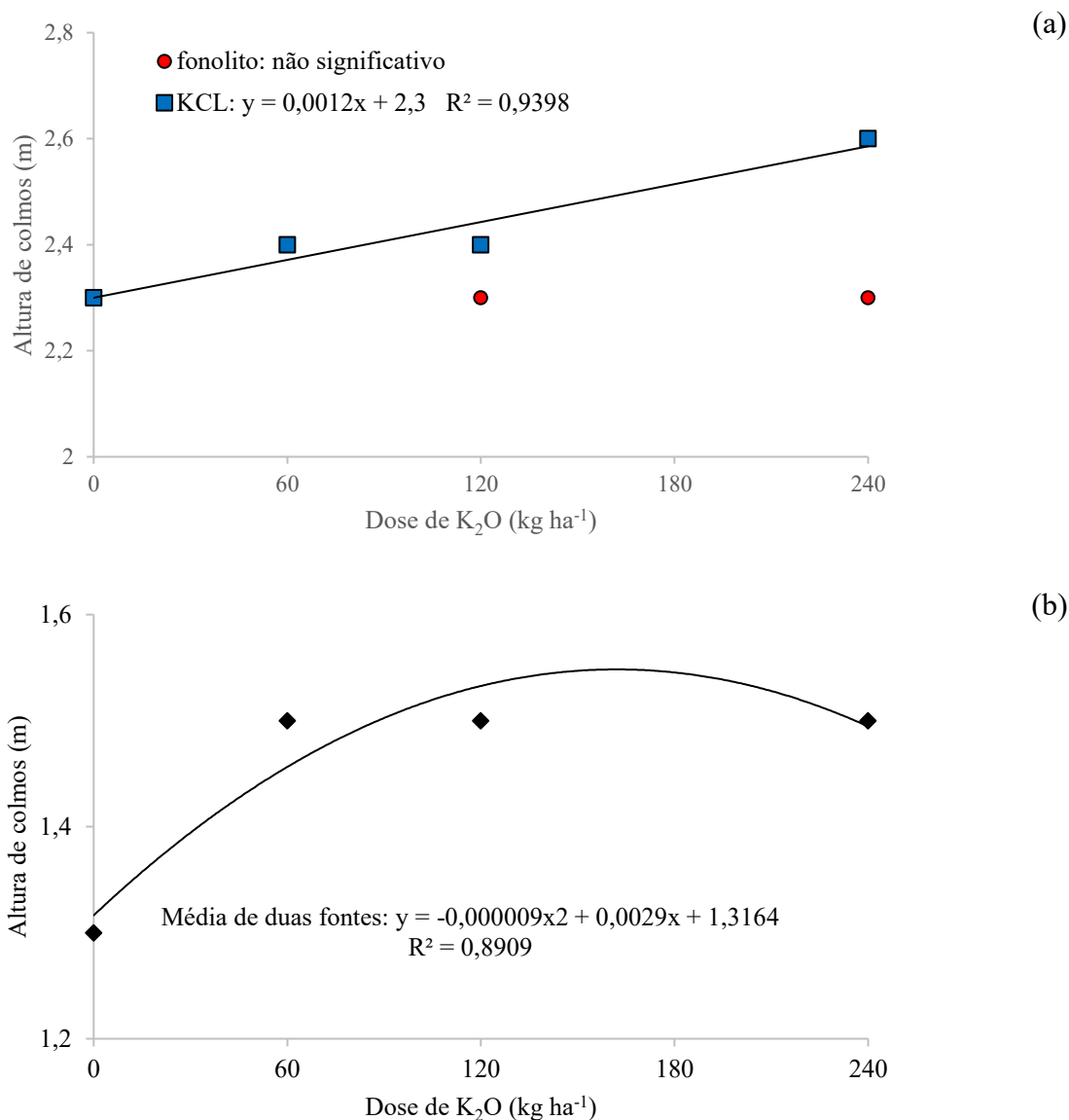


Figura 8. Altura de plantas de cana de 2º corte (a) e 3º corte (b) em resposta a aplicação de diferentes doses de K₂O.

Luz et al. (2013) avaliaram o efeito de fontes de potássio em cultivo de 3º corte de cana, variedade SP 801816, colhida mecanicamente sem queima, em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico textura média, com $0,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K, e verificaram que o fonolito de Poços de Caldas-MG teve desempenho similar ao KCl, quando aplicados na mesma dose (100 kg ha^{-1} de K₂O), sendo ambos superiores ao controle (i.e., ausência da adubação potássica), para TCH e para o teor foliar de potássio. Quando as fontes foram acrescentadas ao processo compostado de torta de filtro, não houve diferença significativa entre o fonolito e o KCl, porém numericamente o fonolito proporcionou incremento de $12,3 \text{ t ha}^{-1}$ colmos de cana, incremento de 12,5%, como também maiores teores de K foliar. Em relação aos teores residuais de potássio no solo, o KCl apresentou maior valor residual ($1,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de solo) em relação ao fonolito ($1,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$

de solo), que foi equivalente ao tratamento controle, tanto para os produtos aplicados com torta de filtrou ou não.

A liberação gradual do potássio contido no fonolito promove fornecimento gradual do nutriente, diminuindo a competição iônica entre o K^+ e o Mg^{2+} que possa vir a acontecer e causar desequilíbrio com o magnésio. Garcia et al, (2022) verificaram que altas doses de K interferem significativamente nos efeitos positivos do Mg no crescimento das plantas, atividade da rubisco e acúmulo de amido em órgãos drenos, como raízes e caules. É óbvio que o desequilíbrio entre a nutrição de K e Mg na cana-de-açúcar resulta em consequências adversas na capacidade produtiva de açúcar.

4.2.5. Aumento de produtividade, produtividade relativa e índice de eficiência agronômica

Independentemente da fonte ou da dose de potássio utilizada, houve aumento da produtividade e conseqüentemente produtividade relativa acima de 100% para TCH da 1ª e 2ª soca e acumulado dos dois cortes (Tabela 10). Na 1ª soca, independentemente da dose de potássio utilizada houve aumento de 13,4 e 8,7 TCH, produtividade relativa de 116,0 e 110,3% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agronômica médio de 102,9%. Na 2ª soca, independentemente da dose de potássio utilizada, houve aumento de 2,9 e 7,3 no TCH, e produtividade relativa de 107,4 e 118,8% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agronômica média de 90,5%. Para o acumulado das duas safras, independentemente da dose de potássio utilizada, houve aumento de 16,3 e 15,9 no TCH, e produtividade relativa de 113,3 e 113,0% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agronômica média de 100,3%.

Tabela 10. Aumento de produtividade, produtividade relativa e índice de eficiência agrônômica (IEA) para 1ª soca, 2ª soca e acumulado para TCH.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média	Fonolito	KCl	Média	Fonolito
	Aumento de produtividade (t ha ⁻¹) ¹			Produtividade relativa (%) ²			IEA (%) ³
TCH 2ª corte							
60	10,8	12,8	11,8	112,9	115,3	114,1	97,9
120	18,7	6,7	12,7	122,3	108,0	115,2	113,2
240	10,8	6,5	8,7	112,9	107,7	110,3	104,8
Média	13,4	8,7	-	116,0	110,3	-	105,3
TCH 3ª corte							
60	3,4	5,5	4,5	108,8	114,2	111,5	95,2
120	3,1	7,3	5,2	108,0	118,9	113,5	90,8
240	2,1	9,0	5,6	105,4	123,3	114,4	85,5
Média	2,9	7,3	-	107,4	118,8	-	90,5
TCH acumulado							
60	14,2	18,3	16,3	111,6	114,9	113,3	97,1
120	21,8	14,0	17,9	117,8	111,4	114,6	105,7
240	12,9	15,5	14,2	110,5	112,7	111,6	98,1
Média	16,3	15,9	-	113,3	113,0	-	100,3

(1) Aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de K; (2) Produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%); (3) IEA obtido em relação a fonte tradicional

Independentemente da fonte ou da dose de potássio utilizada, houve aumento da produtividade e, conseqüentemente, produtividade relativa acima de 100% para TAH da 1ª e 2ª soca e no acumulado dos dois cortes (Tabela 11). Na 1ª soca, independentemente da dose de potássio utilizada, houve aumento de 3,4 e 2,5 no TAH, produtividade relativa de 124,1 e 117,5% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agrônômica média de 105,8%. Na 2ª soca, independentemente da dose de potássio utilizada, houve aumento de 0,8 e 1,3 no TAH e produtividade relativa de 112,9 e 121,5% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agrônômica média de 93,1%. Para o acumulado das duas safras, independentemente da dose de potássio utilizada houve aumento de 4,2 e 3,8 no TCH, produtividade relativa de 120,5 e 118,7% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agrônômica média de 101,5%.

Tabela 11. Aumento de produtividade, produtividade relativa e índice de eficiência agrônômica (IEA) para 1ª soca, 2ª soca e acumulado para TAH.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média	Fonolito	KCl	Média	Fonolito
	Aumento de produtividade (t ha ⁻¹) ¹			Produtividade relativa (%) ²			IEA (%) ³
TAH 2ª corte							
60	3,0	3,6	3,3	121,3	125,5	123,4	96,6
120	4,9	2,4	3,7	134,8	117,0	125,9	115,2
240	2,3	1,4	1,9	116,3	109,9	113,1	105,8
Média	3,4	2,5	-	124,1	117,5	-	105,8
TAH 3ª corte							
60	1,1	1,0	1,1	117,7	116,1	116,9	101,4
120	0,9	1,4	1,2	114,5	122,6	118,6	93,4
240	0,4	1,6	1,0	106,5	125,8	116,2	84,6
Média	0,8	1,3	-	112,9	121,5	-	93,1
TAH acumulado							
60	4,0	4,6	4,3	119,7	122,7	121,2	97,6
120	5,8	3,8	4,8	128,6	118,7	123,7	108,3
240	2,7	3,0	2,9	113,3	114,8	114,1	98,7
Média	4,2	3,8	-	120,5	118,7	-	101,5

(1) Aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de K; (2) Produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%); (3) IEA obtido em relação a fonte tradicional

Independentemente da fonte ou da dose de potássio utilizada, houve aumento da produtividade e conseqüentemente produtividade relativa acima de 100% para ATR da 1ª e 2ª soca e no acumulado dos dois cortes (Tabela 12). Na 1ª soca, independentemente da dose de potássio utilizada houve aumento de 10,8 e 10,9 ATR, produtividade relativa de 106,4 e 106,5% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agrônômica média de 99,9%. Na 2ª soca, independentemente da dose de potássio utilizada houve aumento de 8,6 e 4,4 ATR, produtividade relativa de 105,3 e 102,8% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agrônômica média de 102,5%. Para o acumulado das duas safras, independentemente da dose de potássio utilizada houve aumento de 9,6 e 7,7 no ATR, produtividade relativa de 105,9 e 104,7% com a utilização de fonolito e KCl, respectivamente, e índice de eficiência agrônômica média de 101,1%.

Ao avaliarem o efeito da aplicação de cloreto de potássio, vinhaça, fonolito e fonolito associado à vinhaça, em plantio de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho Distrófico com teor de 0,24 mmolc dm⁻³ de K, Tranches et al. (2022) não verificaram diferença entre os tratamentos e em relação ao tratamento controle, para número de perfilhos, TCH, Brix, ATR e POL. No mesmo trabalho, foi verificado que a associação entre o fonolito e vinhaça promoveu aumento de 6% de TAH, em relação ao tratamento controle.

A utilização de vinhaça acarreta modificação na microbiologia do solo, alterando a comunidade microbiana residente no solo (LOURENÇO et al., 2018), promovendo a diminuição do C da biomassa microbiana do solo e aumento do N da biomassa microbiana do solo (PINTO et al., 2022), bem como aumento da população de fungos e bactérias (SANTOS et al., 2009). A utilização de microrganismos proporciona aumento da solubilização do fonolito, como já relatado para o fungo *Aspergillus niger* (BRANDÃO et al., 2014) e algumas bactérias (SILVA et al., 2011).

Tabela 12. Aumento de produtividade, produtividade relativa e índice de eficiência agrônômica (IEA) para 1ª soca, 2ª soca e acumulado para ATR.

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média	Fonolito	KCl	Média	Fonolito
	Aumento de produtividade (t ha ⁻¹) ¹			Produtividade relativa (%) ²			IEA (%) ³
ATR 2ª corte							
60	11,0	14,9	13,0	106,5	108,9	107,7	97,9
120	17,3	14,3	15,8	110,3	108,5	109,4	101,6
240	4,0	3,6	3,8	102,4	102,1	102,3	100,2
Média	10,8	10,9	-	106,4	106,5	-	99,9
ATR 3ª corte							
60	13,5	4,2	8,9	108,4	102,6	105,5	105,7
120	9,5	5,7	7,6	105,9	103,6	104,8	102,3
240	2,7	3,3	3,0	101,7	102,1	101,9	99,6
Média	8,6	4,4	-	105,3	102,8	-	102,5
ATR médio							
60	12,2	9,6	10,9	107,4	105,9	106,7	101,5
120	13,4	10,0	11,7	108,2	106,1	107,2	102,0
240	3,3	3,5	3,4	102,0	102,1	102,1	99,9
Média	9,6	7,7	-	105,9	104,7	-	101,1

(1) Aumento da produtividade em relação ao rendimento médio do controle sem aplicação de K; (2) Produtividade relativa obtida em relação à média do controle (controle = 100%); (3) IEA obtido em relação a fonte tradicional

Ao se avaliarem os teores de potássio e silício após a colheita da cana soca 3º corte, verificou-se que os maiores valores de K no solo foram obtidos com a aplicação da maior dose de fonolito (240 kg ha⁻¹ de K₂O), com ganhos de 0,05 cmol_c dm⁻³ em relação ao controle e 0,04 cmol_c dm⁻³ em relação ao KCl aplicado nesta mesma dose (Tabela 13). Além disso, a aplicação do fonolito resultou em maiores teores médios de Si no solo, com acréscimos de 0,9 mg dm⁻³ em relação ao KCl (Tabela 13). Foram obtidos ajustes de modelos de regressão linear que demonstram o efeito das doses crescentes de fonolito nos teores de K e Si do solo (Figura 9 e 10).

Tabela 13. Teores de K (extrator resina) e Si (extrator CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) no solo na camada de 0-20 cm, após cultivado por dois anos consecutivos com cana-de-açúcar (2^o e 3^o corte).

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Fonolito	KCl	Média
	K _{resina} no solo (cmol _c dm ⁻³)		
0	0,11		
60	0,13 a	0,12 a	0,12
120	0,12 a	0,13 a	0,12
240	0,16 b*	0,12 a	0,14
Média	0,14*	0,12	
Si_{CaCl2 0,01 mol L⁻¹} no solo (mg dm⁻³)			
0	4,1		
60	4,3	4,0	4,2
120	4,9	4,1	4,5
240	5,5	4,0	4,8
Média	4,9 a	4,0 b	

K solo: CV: 12,1%; DMSTukey: 0,02; DMSDunnet: 0,03.

Si solo: CS: CV: 12,8%; DMSTukey: 0,5; DMSDunnet: 0,9.

Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. * Difere do tratamento controle pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Em testes de incubação desenvolvidos por Martins et al. (2015) e Paredes Filho et al. (2020), por período de 45 e 90 dias, respectivamente, também foi verificado que a utilização do fonolito tem se mostrado eficiente em aumentar os teores de K no solo. Paredes Filho et al. (2020) ainda verificaram que a aplicação do fonolito associado com estirpes bacterianas aumentou os teores de K no solo, embora esses fossem inferiores ao valor encontrado com KCl. Estudos têm demonstrado que a produção de ácidos orgânicos pelos microrganismos constitui o principal mecanismo para biossolubilização de minerais de rocha, dentre elas as potássicas (KALINOWISKI & SCHWEDA, 1996; MALMSTRÖM & BANWART, 1997).

Padua e Florentino (2022) verificaram que após o cultivo de feijão em vaso, a aplicação de doses crescentes de fonolito inoculadas com bactérias solubilizadoras de potássio teve relação direta com maiores valores de K no solo. Dessa maneira, o uso da fonte alternativa de K é, sem dúvida, benéfica quando se refere ao K residual.

As taxas de dissolução mineral de rochas portadoras de potássio têm sido repetidamente subestimadas por não levarem em conta a influência de plantas na cinética de intemperismo (BORMANN et al., 1998; HINSINGER et al., 2001). Nessas condições, evidências mostram que os minerais silicatados, incluindo os feldspatos, se dissolvem mais rapidamente do que o indicado em experimentos de laboratório (MANNING, 2018), isso porque as plantas influenciam a condição biológica e física do solo, particularmente na rizosfera, onde as condições podem diferir muito daquelas do solo. Temperatura, pH, níveis de umidade, concentrações elementares e gasosas

flutuam nestas esferas e assim alteram a velocidade e quase-equilíbrio das reações entre a fase mineral sólida e a solução do solo (HARLEY E GILKES, 2000; MARSCHNER, 2002).

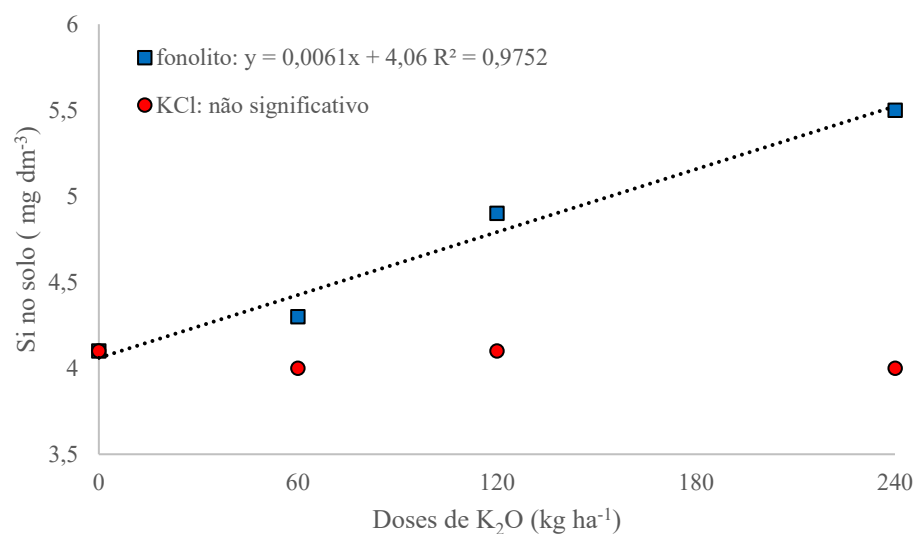


Figura 9. Teores de Si no solo extraído pelo método CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em resposta a diferentes doses de potássio.

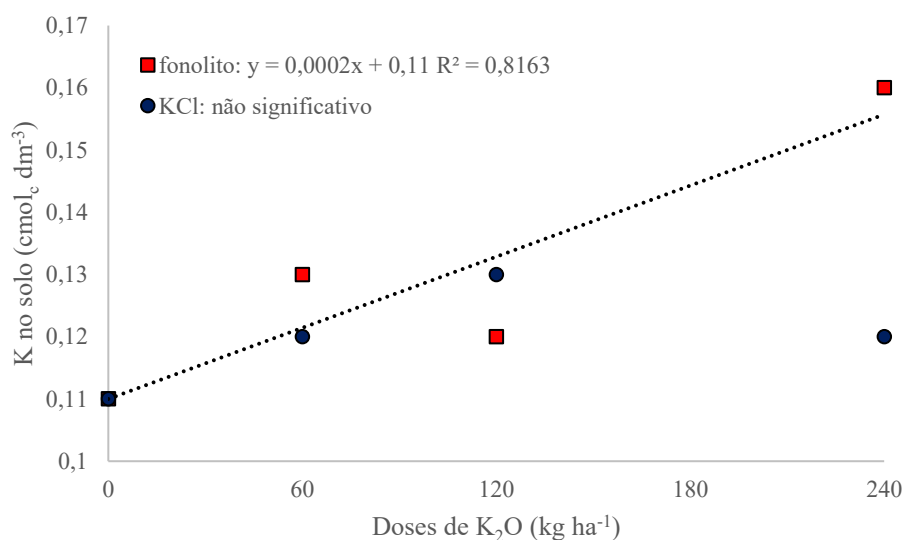


Figura 10. Teores de K no solo extraídos pelo método da resina em resposta a diferentes doses de potássio.

Por se tratar de uma fonte com recente interesse em utilização como insumo na agricultura, a intensificação de pesquisas que tragam informações sobre o desempenho agrônomo do fonolito nas diversas culturas e sistemas produtivos é importante para o bom entendimento dessa fonte e a melhor indicação de uso. Dentro dos temas que podem ser abordados em pesquisa, os fatores que interferem na dissolução e liberação dos nutrientes e elementos presentes dessa fonte, como:

textura, mineralogia, atividade biológica do solo, tempo de contato da fonte no solo, sistema produtivo, podem trazer melhor entendimento das formas de uso do fonolito.

4. CONCLUSÕES

A adubação com potássio, independentemente da fonte, proporcionou aumento da produtividade de colmos, ATR e produtividade de açúcar, tanto no efeito direto, como também para o efeito residual e no efeito acumulativo.

O fonolito apresentou resultados equivalentes ao KCl em relação às concentrações foliares de K, Na, Si, Cu, Fe, Mn, Zn, produtividade de colmos, açúcar total recuperável e produtividade de açúcar.

O fonolito proporcionou incremento nas concentrações de silício e potássio no solo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A procura por fontes alternativas de nutrientes tem apresentando significativo aumento nos últimos anos, principalmente devido ao aumento dos custos, disponibilidade e de aspectos relacionados a sustentabilidade das fontes tradicionais. Os resultados obtidos nos dois experimentos apresentados nessa tese, mostram que o fonolito de Poços de Caldas apresenta grande potencial de utilização como fonte de potássio, pois mostrou resultados semelhantes ao KCl em cana planta e soca, no seu efeito direto como no efeito residual.

Os dados obtidos nos apontam a necessidade de novos estudos para um melhor entendimento das fontes alternativas de K no Brasil, visando atender uma demanda crescente e autossuficiência da nossa agricultura. Nesse sentido, informações que carecem serem investigadas passam pela dinâmica dessas fontes no sistema solo, extratores de potássio no solo, interação da biologia do solo na dissolução e disponibilidade dos nutrientes as plantas, assim como a resposta em diferentes, solos, manejos e culturas, proporcionariam melhor entendimento do potencial de utilização deste tipo de fonte, visto que, estas fontes podem interagir diferentemente em cada condição de uso. Por se tratar de fonte de baixa solubilidade e multielementar, o enfoque multidisciplinar tem-se mostrado um caminho promissor em busca do complexo entendimento das múltiplas respostas que essas fontes podem proporcionar.

Deste modo, o empenho em pesquisas que busquem o entendimento do potencial de utilização das fontes alternativas como o fonolito faz-se necessário para um desenvolvimento mais sustentável da agricultura brasileira, sustentabilidade econômica, social e ambiental.

6. REFERÊNCIAS

ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Pesquisa Setorial**. Disponível em: <http://anda.org.br>, acesso em: 31 mar. 2022.

ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. Setor de Fertilizantes: **Anuário Estatístico 2020**. São Paulo, 2021.

BOOK, O. J.; CATANI, R.A.; FREIRE, E.S. Adubação da batatinha: experiências com leucita, sulfato e cloreto de potássio. **Bragantia**, v. 19, n. 51, p. 811-828, 1960.

BORMANN, B. T., WANG, D., SNYDER, M. C., BORMANN, F. H., BENOIT, G., & APRIL, R. Rapid, plant-induced weathering in an aggrading experimental ecosystem. **Biogeochemistry**, v. 43, n. 2, p. 129-155, 1988. <https://doi.org/10.1029/2007GB002957>.

BRANDÃO, J. A. V.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; CECCATO-ANTONINI, S. R. Solubilization of diabase and phonolite dust by filamentous fungus. **Revista Ceres**, v. 61, p. 740-745, 2014. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461050018>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 5, de 10 de março de 2016, diário oficial da união Publicado**, Brasília, DF, ed. 49, seção 1, p. 10 https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106 acesso em: 29 mai. 2022.

CALIGARIS, B.; RANGEL, L.; POLIDORO, J.; FARIAS, P. **A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil**. **Revista política agrícola**. Ano XXXI – No 1 – Jan./Fev./Mar. 2022. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1142514/1/A-importancia-do-PNF.pdf>, acesso em: 29 mai. 2022.

CATANI, R. A.; GALLO, J. R. A disponibilidade do potássio da "Leucita de Poços de Caldas", estudada por meio do arroz. **Anais...** da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", v. 17, p. 30-35, 1960.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTCIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 9, n. 1, abril 2022.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CONSECANA). **Manual de instruções**. 5.ed, Piracicaba, 2006. 112p.

DUARTE, I. N.; KORNDÖRFER, G. H.; SANTOS, D. S. Rochagem com o fonolito para cana planta. In: II Congresso Brasileiro de Rochagem, 2013, Poços de Caldas (MG). **Anais...** Poços de Caldas (MG), p. 292-300, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. – Brasília-DF. 2018. 356 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Esclarecimentos sobre uso de agrominerais silicáticos (remineralizadores) na agricultura - Esclarecimentos Oficiais**. 2020. https://www.embrapa.br/esclarecimentos-oficiais/-/asset_publisher/TMQZKu1jxu5K/content/esclarecimentos-sobre-uso-de-agrominerais-silicaticos-remineralizadores-na-agricultura?inheritRedirect=false, acesso em 29 mai. 2022.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.3 8, n. 2, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

GARCIA, A.; CRUSCIOL, C. A. C.; ROSOLEM, C. A.; et al. Potassium-magnesium imbalance causes detrimental effects on growth, starch allocation and Rubisco activity in sugarcane plants. **Plant Soil**, v. 472, p. 225–238, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05222-2>.

HARLEY, A., GILKES, R. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v. 56, p. 11–36, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>.

HINSINGER, P.; FERNANDES BARROS, O. N.; BENEDETTI, M. F.; NOACK, Y.; CALLOT, G. Plant-induced weathering of a basaltic rock: Experimental evidence. **Geochim. Cosmochim. Acta**. v. 65, p. 137–152, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00524-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00524-X).

KALINOWSKI, B. E.; SCHWEDA, P. Kinetics of muscovite, phlogopite, and biotite dissolution and alteration at pH 1–4, room temperature. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 60, n. 3, p. 367-385, 1996. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00411-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00411-4).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. 34 p. (Boletim Técnico, 2).

LOURENÇO, K. S.; SULEIMAN, A. K. A.; PIJL, A.; VAN VEEN, J. A.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Resilience of the resident soil microbiome to organic and inorganic amendment disturbances and to temporary bacterial invasion. **Microbiome**, v. 6, p. 1–12, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0525-1>.

LUZ, P. H. de C.; PERES, C. E. B.; YASUDA, M.; FERRAZ, M. R.; CASADEI, R. A.; LUNARDI, L. J. Avaliação do desempenho do fonolito via mineral e no enriquecimento da torta de filtro em soqueira de cana-de-açúcar. In: THEODORO, S. H.; MARTINS, E. S.; FERNANDES, M. M.; CARVALHO, A. M. X. II Congresso brasileiro de rochagem. **Anais... Viçosa: Universidade Federal de Viçosa**. p. 301-311. 2013.

MALMSTRÖM, M., BANWART, S. Biotite dissolution at 25° C: The pH dependence of dissolution rate and stoichiometry. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, n. 14, p. 2779-2799, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00093-8).

MANCUSO, M. A. C. SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A. Effect of potassium sources and rates on Arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1448–1456, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>.

MANNING, D. A. C. Innovation in Resourcing Geological Materials as Crop Nutrients. **Natural Resources Research**. v. 27, p. 217–227, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9347-2>.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic, 2002. 889p.

MARTINS, V.; SILVA, D. R. G.; MARCHI, G.; LEITE, M. C. A.; MARTINS, É. D. S.; GONÇALVES, A. S. F.; GUILHERME, L. R. G. Effect of alternative multinutrient sources on soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, n. 1, p. 194-204, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150587>.

MORAES NETO, S. P. de.; MARTINS, E. de S. Comparação entre adubação com cloreto de potássio e dois tipos de rochas potássicas no crescimento de *Eucalyptus urophylla*. **Agropecuária Técnica**, p. 83-91, 2020. <https://doi.org/10.25066/agrotec.v41i3-4.50775>.

NEVES. O. S.; CAVALERA, P. A.; ABRAMIDES, E.; FREIRE, E. S. Adubação do algodoeiro. X - Ensaio com diversos adubos potássicos. **Bragantia**, v. 19, n. 12, p. 183-200, 1960.

PÁDUA, S. D.; FLORENTINO, L. A. Uso do fonolito e bactérias solubilizadoras de potássio na cultura do feijoeiro. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, e53711226248, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i2.26248>.

PAREDES FILHO, M. V.; MESQUITA, A. C.; MANTOVANI, J. R.; REZENDE, A. V.; FLORENTINO L. A. Estirpes bacterianas reduzem potencial de solubilização de potássio no solo. **Bioscience Journal**. Uberlândia, v. 36, n. 5, p. 1577-1582, Sept./Oct. 2020 <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v36n5a2020-42326>.

PINTO, L. E.; CORDEIRO, C. F. D. S.; DE ARAUJO, A. S.; ARAUJO, F. F. D. Vinasse improves soil quality and increases the yields of soybean, maize, and pasture. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 26, 335-340, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p335-340>.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. **Outras culturas industriais.** In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas, Fundação IAC, 1997. p.233-243. (Boletim, 100).

SANTOS, T. M. C.; DOS SANTOS, M. A. L., DOS SANTOS, C. G., DOS SANTOS, V. R.; DOS SANTOS PACHECO, D. Efeito da fertirrigação com vinhaça nos microrganismos do solo. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, p. 155-160, 2009.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research.** v. 11, p. 3733-3740, 2016. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522>.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília, Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2009. 627p.

SILVA, U.; GOMES, E.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; DIAS, F.; FRADE, Y.; MARRIEL, I. Biossolubilização de fonolito por microrganismos do solo solubilizadores de potássio. In: Congresso brasileiro de ciência do solo. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas. **Anais...** Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; COSTA, C. H. M. da; GILABEL, A. P.; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Silicate rocks as an alternative potassium fertilizer for upland rice and common bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, e01411, 10 p., 2021a. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01411>.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; GILABEL, A. P.; COSTA, C. H. M. da; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Efficiency and residual effect of alternative potassium sources in grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, 10 p., 2021b. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02686>.

SYSTAT SOFTWARE. SigmaPlot statistics user's guide, version 11.2 ed. Systat Software, Inc., San Jose, Costa Rica, 2009.

TAVARES, L. D. F.; DE CARVALHO, A. M. X.; CAMARGO, L. G. B.; PEREIRA, S. G. D. F.; CARDOSO, I. M. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 7, n. 2, p. 89-98, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x>.

TOLEDO, F. H. S. F.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; MARIÑO, Y. A.; Biomassa aérea, transpiração e eficiência do uso da água em plantações de eucalipto fertilizadas com KCl, NaCl e pó de rocha fonolítica. **New Forests**, v. 51, p. 469–488, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09743-8>.

TRANCHES, E. R.; SOUZA, F. R. da C.; SANTOS, A. R. dos.; SANTOS, N. B. dos.; BIANCHINI, H. C.; FLORENTINO, L. A. Use of phonolite associated with vinasse in sugarcane cultivation. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. e3311426996, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.26996>.

WU, Q.; ZHOU, W.; CHEN, D.; CAI, A.; AO, J.; HUANG, Z. Optimizing soil and fertilizer phosphorus management according to the yield response and phosphorus use efficiency of sugarcane in southern China. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20 p. 1655–1664, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00236-8>.