

Meta-análise sobre uso de pó de rocha silicática como fonte de nutrientes para a agricultura

Kinston Tin Mai⁽¹⁾; Ricardo de Castro Dias⁽²⁾; Everaldo Zonta⁽³⁾; Paulo César Teixeira⁽⁴⁾; Vinicius de Melo Benites⁽⁵⁾.

⁽¹⁾ Estudante de Engenharia Agrícola e Ambiental na UFF, estagiário da Embrapa Solos. ⁽²⁾ Professor da Universidade de Rio Verde, Rio Verde-GO.

⁽³⁾ Professor titular do Departamento de Solos da UFRRJ, Seropédica-RJ. ⁽⁴⁾ Pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro-RJ. ⁽⁵⁾ Pesquisador na Embrapa Solos; orientador.

Resumo – O interesse por fontes alternativas de potássio (K) na agricultura levou a avaliação da eficiência de rochas silicáticas moídas como fontes de K para as plantas. Este estudo realizou uma meta-análise para integrar os resultados de pesquisas sobre o tema, seguindo as diretrizes do PRISMA. De 583 artigos inicialmente encontrados, 43 atenderam aos critérios de elegibilidade e foram incluídos na análise. Os efeitos foram medidos como o logaritmo natural da razão de resposta, comparando a aplicação de pó de rocha com a ausência de K. A aplicação de até 5 Mg ha⁻¹ de pó de rocha resultou em um aumento limitado, com 12% na produção de biomassa e 25% no acúmulo de K. Rochas ultramáficas mostraram maior eficiência, com aumento de 56% na biomassa e 69% no acúmulo de K. No entanto, rochas com granulometria superior a 2 mm não apresentaram efeitos significativos. Doses superiores a 5 Mg ha⁻¹ e granulometria inferior a 0,3 mm elevaram a biomassa em 84% e o K em 351%. Comparado aos fertilizantes solúveis, o pó de rocha reduziu a biomassa em 16% e o acúmulo de K em 47%. Portanto, apesar dos efeitos positivos em comparação à não aplicação de K, o pó de rocha silicática é menos eficiente que fertilizantes solúveis na maximização da produção de matéria seca e acúmulo de K.

Palavras-Chave: Pó de rocha, Nutrição mineral de plantas, Eficiência agrônômica, Rochas silicáticas, Remineralizador.

Introdução

O K é um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, cuja deficiência pode comprometer o rendimento e a qualidade agrícola (Zhao et al., 2019). Com a produção global de K concentrada em poucos países do hemisfério norte, como Bielorrússia, Canadá, China, Alemanha e Rússia, países em desenvolvimento, como o Brasil, dependem da importação desse insumo (Ogasawara et al., 2010; Swoboda et al., 2022).

Devido ao alto custo dos fertilizantes convencionais, torna-se urgente explorar fontes alternativas de K. Embora as reservas de potássio altamente solúveis estejam concentradas em poucos países, minerais silicáticos que contêm K, como micas e feldspatos, são abundantes em diversas partes do mundo (Zhao et al., 2019).

Esta pesquisa busca examinar a eficácia das rochas silicáticas como fonte de K por meio de uma revisão sistemática e meta-análise, com o objetivo de sintetizar o conhecimento existente e fornecer uma avaliação detalhada da viabilidade desses pós rochosos na nutrição de plantas cultivadas.

Material e Métodos

A pesquisa utilizou revisão sistemática e meta-análise para avaliar a eficiência do pó de rocha silicática como fonte de K. A revisão sistemática seguiu as diretrizes PRISMA para identificar, selecionar e analisar estudos relevantes com base em uma pergunta bem definida (Moher et al., 2009). A meta-análise integrou os resultados desses estudos, utilizando o tamanho de efeito e a razão de resposta (RR) ou o logaritmo natural da razão de resposta (lnRR) para medir a alteração entre grupos de tratamento e controle (Borenstein et al., 2009; Lajeunesse, 2015).

A pergunta de pesquisa foi formulada com base no modelo PICOT, que inclui população, intervenção, comparação, resultado e tempo (Echevarria E Walker, 2015). A pesquisa focou em plantas cultivadas, aplicação de pó de rocha silicática como fonte de K, comparando com controle negativo

(sem K) e controle positivo (fertilizantes solúveis). Foram pesquisadas publicações até outubro de 2020 nas plataformas Oasis, Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Springer Science, utilizando o algoritmo booleano e filtrando artigos nas áreas de ciências biológicas, agrícolas e ambientais. Inicialmente, 582 artigos foram selecionados, dos quais 169 foram considerados elegíveis na primeira etapa de triagem de título e resumo. Na segunda etapa, foram avaliados apenas os tópicos de Material e Métodos dos artigos, e se atendiam aos critérios de elegibilidade. Os critérios de elegibilidade incluíam: (1) a presença de pelo menos um tratamento com a aplicação de pó de rocha silicática; (2) a avaliação da produção de matéria seca, de produtos de interesse comercial (como grãos, frutos, tubérculos, colmos e fibras) e/ou do acúmulo de potássio; (3) a aplicação correta dos princípios da experimentação agrícola, como casualização, repetição e controle local; e (4) a utilização do pó de rocha silicática como fonte isolada de K, sem a combinação com outros fertilizantes ou insumos que pudessem interferir nos resultados. Assim sobrando apenas 91 artigos que seguiram os critérios de elegibilidade específicos.

A extração de dados focou em variáveis como produção de matéria seca, acúmulo de K e produção comercial, categorizando os dados por dose de pó de rocha, granulometria e tipo de rocha. Foram incluídos na análise final 43 artigos, pois os demais não apresentaram a média, ou dispersão, ou o número de repetições, ou pelo menos, um dos quatro critérios de elegibilidade predefinidos para análise de tamanho de efeito e impacto do pó de rocha.

A Equação 1 foi utilizada para calcular o logaritmo natural da razão de resposta ($\ln(R)$), que foi considerado como tamanho de efeito. Esse valor reflete os impactos da aplicação de pó de rocha silicática na matéria seca da parte aérea (MSPA), na produção comercial e no acúmulo de potássio

$$\ln(R) = \ln \frac{(\bar{X}_t)}{(\bar{X}_c)} \quad (1)$$

Equação 1. $\bar{X}_t$ e $\bar{X}_c$ são as médias das variáveis do efeito e as barras horizontais ao intervalo de resposta para o grupo que recebeu a aplicação de pó de rocha e para o grupo controle, respectivamente.

em plantas cultivadas, em comparação com a não aplicação de potássio (controle) e também com a aplicação de fertilizante potássico solúvel (Blouin et al., 2019; Wang et al., 2021, 2022).

Resultados

A aplicação de pó de rocha resultou em incremento médio significativo de 19% na produtividade ($p < 0,05$), 30% na produção de biomassa ($p < 0,01$), e 108% no acúmulo de K ($p < 0,01$) em relação

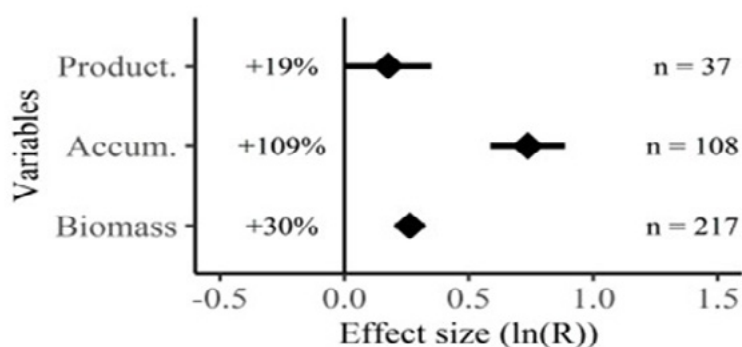


Figura 1. Efeito médio da aplicação do pó de rocha silicática na produção comercial (Prod.), acúmulo de potássio (Acum.) e produção de massa seca (Biomassa) de plantas cultivadas em relação ao tratamento controle, sem aplicação de K. Os diamantes correspondem ao tamanho médio do efeito e as barras horizontais ao intervalo de confiança de 95%. n=número de observações.

ao tratamento controle, sem aplicação de K. O efeito estimado sobre a produção de massa seca foi semelhante à produtividade comercial, enquanto o acúmulo de K foi a variável mais influenciada pela aplicação de pó de rocha.

Quanto aos resultados de aplicação das doses, foi notado que doses $> 5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de pó de rocha silicática proporcionou um aumento de 41% na produção de biomassa e de 206% no acúmulo de K em relação ao controle, ambos em nível de significância inferior à 0,1% (Fig. 2). Enquanto para doses $\leq 5 \text{ Mg ha}^{-1}$ houve um aumento de 12% na produção de biomassa e de 25% no acúmulo de K.

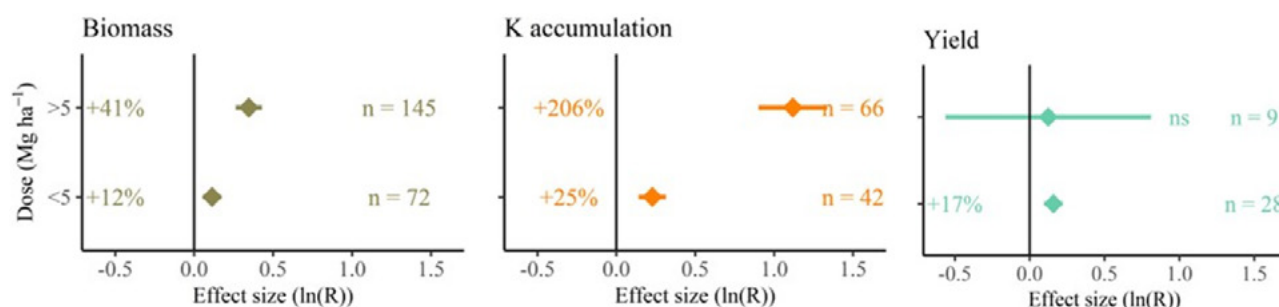


Figura 2. Influência da aplicação de dois níveis de pó de rocha silicatada na produção de matéria seca (Biomassa), acúmulo de potássio (acúmulo de K) e produção comercial (Produto) de plantas cultivadas em relação ao tratamento controle, sem aplicação de K. Os losangos correspondem ao tamanho médio.

Sobre a produção comercial não houve diferença significativa entre os níveis de dose em relação à produção comercial. Porém, ressalta-se o intervalo de confiança relativamente amplo e o pequeno número de casos ($n = 9$) que compõem o tamanho de efeito médio de doses superiores a 5 Mg ha^{-1} .

A aplicação de doses $\leq 5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de pó de rocha mostrou eficiência significativa na produção de biomassa com rochas metamórficas xistosas (+113%) e ultramáficas (+56%), e no acúmulo de K com rochas máficas (+127%), ultramáficas (+69%) e efélsicas (+28%) (Figura 3). No entanto, rochas

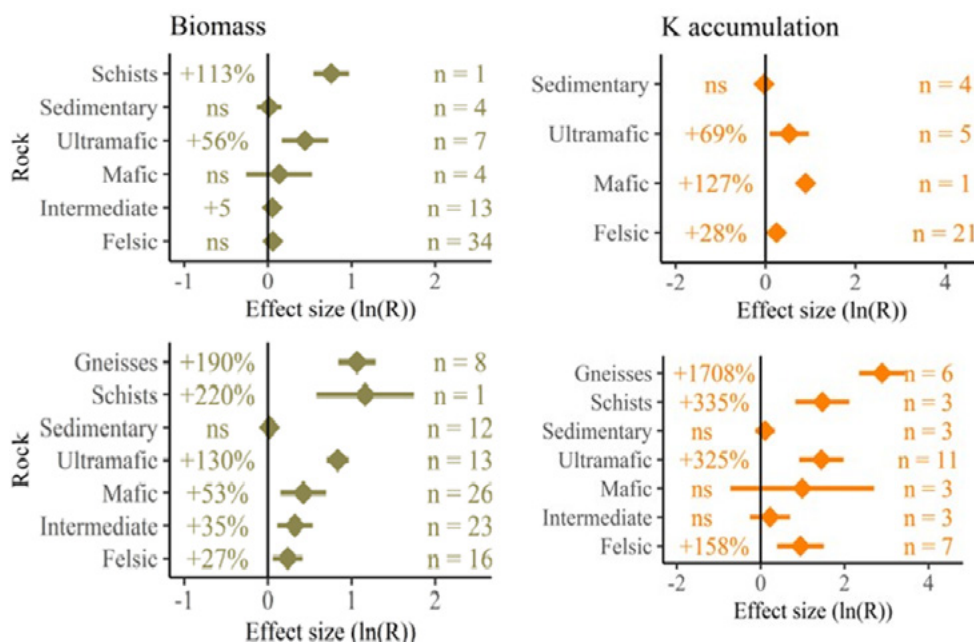


Figura 3. Influência da aplicação de pó de diferentes grupos rochosos em duas classes de dose (até 5 Mg ha^{-1} e além de 5 Mg ha^{-1}), na produção de matéria seca (Biomassa) e acúmulo de K nas plantas cultivadas em relação ao controle/tratamento, sem aplicação de K. Os losangos correspondem ao tamanho médio do efeito e as barras horizontais ao intervalo de confiança de 95%. ns: não significativo ($p < 0,05$); n=número de observações.

silicáticas sedimentares não apresentaram aumentos significativos em ambas as variáveis. Esses resultados devem ser interpretados com cautela devido ao número reduzido de casos em cada classe de rocha, exceto para rochas félsicas.

A aplicação de pó de rocha silicática em doses superiores a 5 Mg ha^{-1} teve um impacto significativo na produção de biomassa em todos os grupos de rochas analisados, exceto nas sedimentares. Rochas metamórficas xistosas, apesar de um caso registrado, mostraram o melhor resultado (Figura 3). As rochas metamórficas gnáissicas e ultramáficas destacaram-se com aumentos de 190% e 130% na produção de biomassa, respectivamente, em contraste com os aumentos menores das rochas félsicas (27%), intermediárias (35%), máficas (53%) e sedimentares (0%). O acúmulo de K foi especialmente elevado nas rochas gnáissicas (1.708%), com aumentos menores em xistosas, ultramáficas e félsicas. Rochas sedimentares, máficas e intermediárias não apresentaram aumentos significativos.

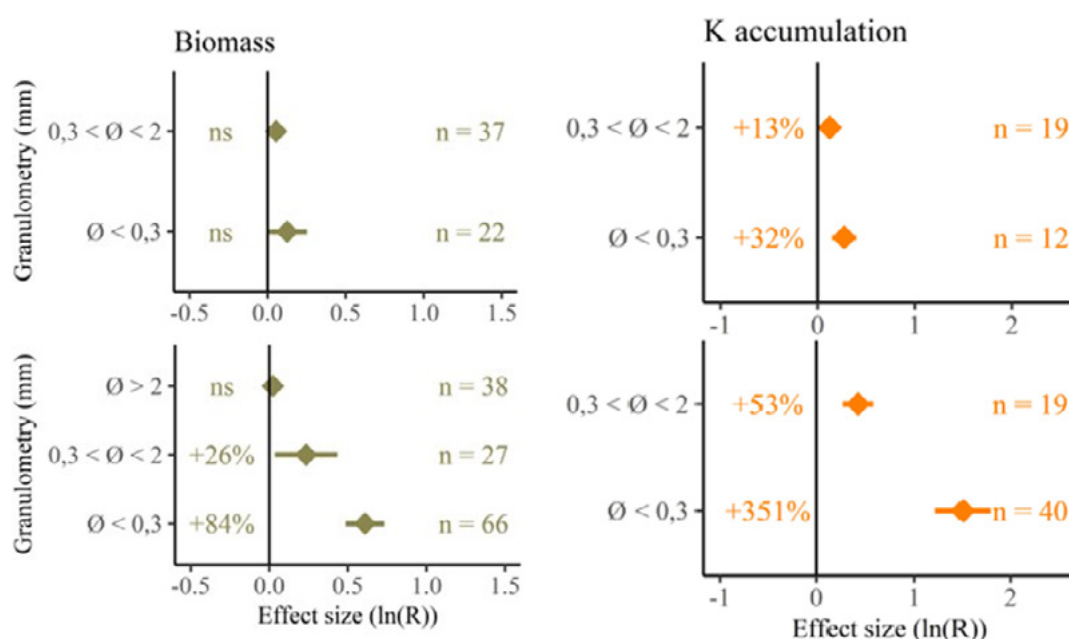


Figura 4. Tamanho do efeito da aplicação de pó de rocha silicatada, em diferentes granulometrias e em diferentes classes de dosagem (até 5 Mg ha^{-1} e além de 5 Mg ha^{-1}), na produção de matéria seca (Biomassa) e K acúmulo em plantas cultivadas. Os diamantes correspondem ao tamanho médio do efeito e as barras horizontais ao intervalo de confiança de 95%. ns: não significativo ($p < 0,05$); n=número de observações.

Levando em conta a granulometria, doses $\leq 5 \text{ Mg ha}^{-1}$ resultaram em incremento nulo na biomassa, mas granulometrias $< 0,3 \text{ mm}$ aumentaram o acúmulo de K em 32%, enquanto granulometrias entre 0,3 e 2 mm geraram um aumento de 13% (figura 4).

Discussão

A eficiência dos pós de rochas silicáticas é influenciada por diversos fatores como tipo de solo, espécies vegetais, tipo de rocha, granulometria, dose aplicada, duração do estudo e ação de micro-organismos (Swoboda et al., 2022). Embora não haja consenso sobre a dose ideal, a maioria dos estudos analisados aplicou doses entre 280 kg ha^{-1} e 1.000 Mg ha^{-1} , com a aplicação comercial mais comum de até 5 Mg ha^{-1} . Nessas doses, observou-se um aumento médio de 12% na biomassa e 25% no acúmulo de potássio, embora esses resultados ainda sejam inferiores aos alcançados com o uso de KCl, que demonstrou maior eficácia (Fageria & Baligar, 2008).

A granulometria das partículas de rocha também desempenha um papel crucial: partículas menores que $0,3 \text{ mm}$ são mais eficientes na liberação de nutrientes, resultando em melhores respostas nas

plantas, embora ainda abaixo das respostas obtidas com fertilizantes solúveis (Dalmora et al., 2020). A composição mineral das rochas influencia diretamente sua capacidade de fornecer nutrientes, com minerais como biotita e feldspato potássico desempenhando papéis distintos (Ramezani et al., 2013). Minerais como olivinas e piroxênios, com altas taxas de dissolução, liberam nutrientes mais rapidamente, enquanto feldspatos potássicos são considerados menos eficientes (Franke, 2009).

No estudo, rochas metamórficas, como xistos e gnaisses, destacaram-se, mostrando aumentos superiores a 100% na produção de matéria seca em comparação ao controle negativo (UNESP, 2022). Xistos, ricos em filossilicatos como clorita, muscovita e biotita, e gnaisses, com alta concentração de feldspatos e biotita, mostraram-se particularmente promissores para a nutrição de plantas, sugerindo que a composição mineral é um fator chave na eficácia dos pós de rocha como fonte de potássio (Bakken et al., 2000). A taxa global de dissolução, determinada pela taxa de quebra de ligação mais lenta, também é crucial. Olivinas têm as maiores taxas de dissolução, seguidas por piroxênios, anfíbios e biotitas, enquanto os minerais mais resistentes ao intemperismo, em ordem crescente, são os feldspatos ricos em potássio, a muscovita e o quartzo (Franke, 2009). Esses detalhes ajudam a correlacionar a composição mineral das rochas com os efeitos observados no estudo.

Embora sejam poucos os casos observados, as rochas metamórficas demonstraram aumentos na produção de matéria seca superiores a 100% em comparação ao tratamento controle negativo. Entre os minerais presentes nos xistos, os filossilicatos desempenham um papel importante na liberação de nutrientes, enquanto os feldspatos potássicos dos gnaisses são menos eficientes (UNESP, 2022). No entanto, mesmo com esses resultados promissores, nenhuma das rochas analisadas superou a eficiência dos fertilizantes solúveis (Bakken et al., 2000; Zhao et al., 2019).

Conclusão

A aplicação de doses superiores a 5 Mg ha⁻¹ de pó de rocha silicática com granulometria inferior a 0,3 mm gerou aumento na produção de biomassa (+84%) e no acúmulo de K (+351%). Em contraste, materiais com granulometria superior a 2 mm não apresentaram efeitos significativos. A meta-análise revelou que o pó de rocha silicática não substitui eficazmente as fontes solúveis de potássio e não age como fertilizante de liberação lenta. Portanto, caso opte por fazer o uso, é recomendado granulometria <0,3mm e a exclusão do uso de rochas de composição félsicas e intermediária.

Agradecimentos

Ao CNPq por disponibilizar recursos para a realização da pesquisa. Ao meu orientador, Vinicius de Melo Benites pelos ensinamentos valiosos. A Jéssica Kaminski, que me auxiliou e acompanhou.

Referências

- BAKKEN, A. K., GAUTNEB, H., SVEISTRUP, T., & MYHR, K. (2000). Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56(1), 53–57. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1009709914578>
- BLOUIN, M., BARRERE, J., MEYER, N., LARTIGUE, S., BAROT, S., & MATHIEU, J. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0579-x>
- BORENSTEIN, M., HEDGES, L. V., HIGGINS, J. P. T., & ROTHSTEIN, H. R. (2009). *Introduction to meta-analysis* (M. Borenstein, L. V. Hedges, J. P. T. Higgins, & H. R. Rothstein (eds.); 1st ed.). John Wiley and Sons Ltd. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-14908-0_2
- DALMORA, A. C., RAMOS, C. G., PLATA, L. G., DA COSTA, M. L., KAUTZMANN, R. M., & OLIVEIRA, L. F. S. (2020). Understanding the mobility of potential nutrients in rock mining by-products: An opportunity for more sustainable agriculture and mining. *Science of the Total Environment*, 710, 136240. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136240>

- ECHEVARRIA, I. M., & WALKER, S. (2015). Start with a PICOT question to make your case. *Nursing Critical Care*, 10(3), 14–16. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/01.CCN.0000464307.39978.1a>
- FAGERIA, N. K., & BALIGAR, V. C. (2008). Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For SustainableCrop Production. *Advances in Agronomy*, 99, 345–399. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)
- FRANKE, W. A. (2009). The durability of rocks—Developing a test of rock resistance to chemical weathering. *American Journal of Science*, 309(8), 711–730. Disponível em: <https://doi.org/10.2475/08.2009.04>
- LAJEUNESSE, M. J. (2015). Bias and correction for thelog response ratio in ecological meta-analysis. *Ecology*, 96(8), 2056–2063. Disponível em: <https://doi.org/10.1890/14-2402.1>
- MOHER, D., LIBERATI, A., TETZLAFF, J., ALTMAN, D. G., ALTMAN, D., ANTES, G., ATKINS, D., BARBOUR, V., BARROWMAN, N., BERLIN, J. A., CLARK, J., CLARKE, M., COOK, D., D'AMICO, R., DEEKS, J. J., DEVEREAUX, P. J., DICKERSIN, K., EGGER, M., ERNST, E., ... TUGWELL, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMAstatement. *PLoS Medicine*, 6(7). Disponível em: <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PMED.1000097>
- OGASAWARA, E. S., KULAIF, Y., & FERNANDES, F. R. C. (2010). A indústria brasileira de fertilizantes (cadeia NPK, enxofre, rocha fosfática e potássio) - Projeções de 2010 a 2030. In F. R. C. Fernandes, A. B. da Luz, & Z. C. Castilhos (Eds.), *Agrominerais para o Brasil* (pp. 145–168). CETEM/MCT. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/907/1/cap5.pdf>
- Ramezani, A., Dahlin, A. S., Campbell, C. D., Hillier, S., Mannerstedt-Fogelfors, B., & Öborn, I. (2013). Addition of a volcanic rockdust to soils has no observable effects on plant yield and nutrient status or on soil microbial activity. *Plant and Soil*, 367(1–2), 419–436. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1474-2>
- SWOBODA, P., DÖRING, T. F., & HAMER, M. (2022). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*, 807, 150976. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>
- UNESP. (2022). Museu Heinz Ebert. Disponível em: <https://museuhe.com.br/>
- WANG, H., WANG, N., QUAN, H., ZHANG, F., FAN, J., FENG, H., CHENG, M., LIAO, Z., WANG, X., & XIANG, Y. (2022). Yield and water productivity of crops, vegetablesand fruits under subsurface drip irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 269. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107645>
- WANG, H., ZHENG, J., FAN, J., ZHANG, F., & HUANG, C. (2021). Grain yield and greenhouse gas emissions frommaize and wheat fields under plastic film and straw mulching: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 270, 108210. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2021.108210>
- ZHAO, X., GAO, S., LU, D., WANG, H., CHEN, X., ZHOU, J., & ZHANG, L. (2019). Can potassium silicate mineralproducts replace conventional potassium fertilizers in rice–wheat rotation? *Agronomy Journal*, 111(4), 2075–2083. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agroni2019.01.0020>