

## **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DA MINERAÇÃO: PÓ DE ROCHA NA ROCHAGEM DE HORTALIÇAS – UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

**LUCAS ZOCA DA COL**  
UNIPAMPA | UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA.

### **Palavras Chave**

Hortaliças, Pó de Rocha, Rochagem

### **Agradecimento a órgão de fomento**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Coordenação e a Comissão de Bolsas, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Programa de Auxílio aos Estudantes dos Programas de Pós-graduação da Unipampa (PAPG/PROPI) 01\_22 .

# REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DA MINERAÇÃO: PÓ DE ROCHA NA ROCHAGEM DE HORTALIÇAS – UMA REVISÃO INTEGRATIVA

## RESUMO

A aplicação de hortaliças de pó de rocha silicatada como corretivo do solo tem sido sugerida por vários autores. Os minerais de silicato formadores de rocha contêm a maioria dos nutrientes necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas superiores. As evidências científicas sobre sua eficácia são, no entanto, contraditórias, que derivam de taxas de intemperismo inconsistentes e das interações complexas de vários fatores. O objetivo deste estudo foi, portanto, apresentar um embasamento teórico que justifique a aplicação agrícola do pó de rocha e revisar ensaios publicados que usaram pó de rocha como corretivo do solo em hortaliças. A revisão é baseada em uma lista que incorpora informações sobre os fatores solo, tipo de planta e rocha, tamanho de partícula, duração do teste e quantidade de aplicação. Ao total, foram observados 17 artigos na área. O pó de rocha leva a resultados significativos quando aplicado em solos altamente intemperizados em ambientes tropicais, bem como em combinação com materiais orgânicos e microrganismos. A dissolução de rochas de silicato melhora com apreensão de partículas mais finas, e a eficácia agrônômica culmina com a moagem de alta energia das rochas. O pó de rocha, com base nos artigos consultados, fortalece as hortaliças e reduz significativamente doenças. Dito isto, em ambientes adequados e com uma combinação certa de materiais orgânicos disponíveis localmente, o pó de rocha pode se tornar uma parte importante de uma estratégia geral para um setor de hortaliças mais sustentável.

**Palavras-chaves:** Hortaliças. Pó de Rocha. Rochagem.

## ABSTRACT

The application of silicate rock powder vegetables as soil corrective has been suggested by several authors. Rock-sumding silicate minerals contain most of the nutrients needed for the growth and development of superior plants. Scientific evidence on its efficacy is, however, contradictory, derived from inconsistent weathering rates and complex interactions of various factors. The aim of this study was, therefore, to present a theoretical basis that justifies the agricultural application of rock powder and to review published essays that used rock powder as soil corrective in vegetables. The review is based on a list that incorporates information about soil factors, plant and rock type, particle size, test duration, and amount of application. In total, 17 articles were observed in the area. Rock powder leads to significant results when applied in highly weathered soils in tropical environments, as well as in combination with organic materials and microorganisms. The dissolution of silicate rocks improves with the seizure of finer particles, and the agronomic efficacy culminates with the high-energy grinding of the rocks. Rock powder, based on the articles consulted, strengthens vegetables and significantly reduces diseases. That said, in suitable environments and with a certain combination of locally available organic materials, rock dust can become an important part of a general strategy for a more sustainable vegetable sector.

**Keywords:** Vegetables. Rock dust. Rocking.

## INTRODUÇÃO

O número de pessoas que passam fome atualmente varia entre 850-950 milhões, dos quais 95% estão concentrados em países em desenvolvimento, principalmente em áreas rurais. Dependendo do cenário subjacente, espera-se que a população mundial atinja entre 8 e 10,5

bilhões de pessoas em 2050, enquanto a mediana de cerca de 9 bilhões é comumente usada para projeções futuras (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2022).

A horticultura enfrentará grandes desafios na produção de alimento suficiente para uma população crescente superar a fome e a insegurança alimentar. Para atender a demanda esperada de alimentos sem aumentos significativos de preços, 70-100% mais alimentos em horticultura devem ser produzidos nos próximos 40 anos. Este aumento projetado deve ser atendido em um momento de crescente pressão da disponibilidade de água, mudanças climáticas, restrições ambientais, aumento da demanda de energia e mercados de commodities agrícolas mais voláteis (PRETTY et al., 2020).

Atualmente, a horticultura, junto com a agricultura, fornece meios de subsistência para 40% da população global, enquanto 70% dos pobres nos países em desenvolvimento dependem direta ou indiretamente da horticultura. Seu objetivo não é mais só e simplesmente aumentar produção de alimentos, mas abordar vários objetivos interligados ao mesmo tempo, como reduzir a fome e a pobreza, melhorar os meios de subsistência e a saúde, apoiar as comunidades, estimular as economias e proteger o meio ambiente, através do equilíbrio ambiente e do uso de recursos sustentáveis. Essa multifuncionalidade da horticultura, expressando a inescapável interconexão dos seus diferentes papéis e suas diferentes funções, requer cooperação inter e transdisciplinar (IAASTD, 2019).

Em partes do Brasil e outras regiões em desenvolvimento, a produção de alimentos ainda está afundando. O declínio da qualidade e quantidade dos solos em todo o mundo é a causa biofísica da queda da produção de alimentos per capita e um dos principais problemas relacionados à segurança alimentar global (IAASTD, 2019). Até 60% dos solos cultivados têm problemas limitantes de crescimento com deficiências de nutrientes minerais e as estimativas sugerem que 23% de toda a terra usada está degradada em algum grau. Existem vários processos de degradação do solo, incluindo erosão, acidificação e degradação biológica, influenciados pelas atividades agrícolas não apropriadas. Os agroecossistemas de manejo intensivo estão removendo nutrientes sem reposição adequada, resultando em uma remoção contínua do solo fértil da superfície (CAKMAK, 2022), o que implica em necessidades de mudança e utilização de outros insumos para a produção em horticultura.

Nesse sentido, melhorar o estado nutricional dos solos por meio de fertilizantes tem sido um passo crítico para aumentar a produção de alimentos desde o início da *Revolução Verde* (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2022; PRETTY et al., 2020). No entanto, em muitos países em desenvolvimento, a maneira tradicional de superar o esgotamento de nutrientes por meio de fertilizantes minerais é limitada, pois os fertilizantes geralmente custam duas a seis vezes mais

do que na Europa. Além disso, fertilizantes sintéticos instantaneamente solúveis estão cada vez mais associados a preocupações ambientais, produção intensiva de energia e diminuição da eficiência de uso (PRETTY et al., 2020).

Dentro desta perspectiva, por meio de uma revisão bibliográfica integrativa, o objetivo desta pesquisa é apresentar percepções científicas quanto ao reaproveitamento de resíduos proveniente da mineração na indústria de hortaliças, por meio da utilização de pó de rocha na rochagem de hortaliças. Estruturalmente, realiza-se em mais três seções, a saber: metodologia científica, resultados e discussão e, por fim, considerações finais. Em frente, apresentam-se os fundamentos metodológicos.

## **METODOLOGIA CIENTÍFICA**

Uma razão para contradições da aplicação de pó de rocha é que o intemperismo depende de interação complexa de vários fatores, como solo, rocha e tipo de planta, apreensão de partículas, quantidade de aplicação, condições climáticas, adição de outros materiais e duração do teste. Além disso, há “falta de consistência em termos de desenho de ensaios individuais, limitando a comparação e extrapolação” (MANNING, 2020, p. 292). Estes fatores descritos raramente são relatados de forma abrangente e os ensaios são, portanto, limitados na medida em que podem ser interpretados (MANNING, 2020).

Além de uma série de estudos que incluem análises bem relatadas dos resultados, há uma falta de estudos que forneçam uma visão abrangente de estudos práticos de campo e fatores relevantes. Movimentos como *Remineralize the Earth* e *The Soil Remineralization Forum* são sustentados pelo uso de pó de rocha. Ambos fornecem bases de dados de pesquisa, mas ainda se restringem principalmente a delinear títulos e resumos dos estudos sem maiores informações. Há uma evidente falta de revisões integrativas na área, que contribuem para reconhecer o estado da arte relacionado com este campo de pesquisa.

Nesse campo, considerando que o objetivo deste estudo é primeiro de apresentar base teórica que justifique a aplicação agrícola do pó de rocha e, em segundo lugar, revisar ensaios publicados que usaram pó de rocha como corretivo do solo, tem-se que esta revisão é baseada em uma lista que incorpora os resultados e informações sobre os fatores mais importantes, como solo, tipo de planta e rocha, tamanho de partícula, duração do teste e quantidade de aplicação. Inclui breve resumo das vantagens e desvantagens, bem como os potenciais sinérgicos, como combinações com materiais orgânicos ou alterações geoquímicas.

Essa lista deve permitir comparação de estudos publicados em meta-nível e uma revisão subdividida dos fatores específicos. Os respectivos fatores serão avaliados quanto à sua

relevância em termos de aplicação de pó de rocha e será analisado se existem correlações entre os fatores específicos e os resultados dos ensaios. De acordo com os resultados, é discutido se o pó de rocha pode ou não ser considerado um corretor de solo adequado para uma agricultura mais sustentável, em que pese se considerar o setor de hortaliças.

Tendo em conta a inconsistência metodológica, complexidade inerente e singularidade virtual de cada ensaio (MANNING, 2020), uma comparação detalhada de vários ensaios não é possível para o escopo deste estudo. Assim, uma comparação mais generalizada dos ensaios por meio dos fatores delineados parece ser uma abordagem razoável. Além disso, dada a atual falta de revisões de literatura sobre a aplicação de pó de rocha em hortaliças, esta visão geral pode servir como uma contribuição valiosa para futuras investigações neste campo.

Uma extensa triagem da literatura foi realizada na revisão. Os artigos publicados foram pesquisados usando os termos “pó de rocha”, “pó de rocha”, “farinha de rocha”, “farinha de pedra”, “fertilizante de rocha de silicato” e “remineralização do solo” em três bases de dados acadêmicas: SCiElo, Periódicos e BDTD. Além disso, campos como agricultura e solo foram adicionados à pesquisa para especificar a triagem. A pesquisa foi realizada concomitantemente por meio de busca de palavras-chave (buscando referências de referências) e abordagens informais como navegação e conhecimento pessoal (GREENHALGH; PEACOCK, 2015), uma vez que pesquisas preliminares indicaram que os títulos de alguns estudos incluem o nome específico do mineral em vez de pedra ou pedra. A revisão foi limitada a estudos escritos em inglês ou alemão e, finalmente, incluiu 17 artigos revisados por pares.

Artigos revisados por pares sobre ensaios de poeira de rocha foram analisados de acordo com uma lista auto-elaborada que incorpora os fatores mais importantes, denominada “lista de fatores importantes” (LFI). Esses fatores não são uniformemente sugeridos na literatura, mas foram baseados nos fatores escolhidos por Manning (2020) para resumo de ensaios com rochas silicatadas como fonte de K. Fatores incluíram: cultura (espécie/cultivar), mineral/rocha, tipo de ensaio, duração, benefícios agronômicos e referência. A lista foi alterada para este estudo excluindo a seção 'espécie/cultivar', uma vez que os ensaios normalmente não elaboram o papel de uma cultivar ou espécie específica. A coluna ‘benefícios agronômicos’ de Manning (2010) dá uma simples indicação de significativo ou insignificante, que foi expandida para uma coluna de ‘resultados’, informando sobre os principais achados de cada estudo.

## **RESULTADOS**

A seção de resultados apresenta os artigos selecionados considerando a lista de fatores importantes (LFI). A Tabela LFI resume os ensaios de estufa (vasos) ou de campo revisados que usaram materiais de rocha de silicato e fornece informações sobre a respectiva cultura e tipo de solo, a quantidade de aplicação, o tamanho das partículas e a duração do ensaio. Os resultados, bem como os respectivos fatores para cada ensaio, variam amplamente e também são elencados para fim de visualização do processo em hortaliças. Logo após a apresentação dos resultados, realiza-se uma discussão quanto aos conceitos e às observações realizadas nas pesquisas que aqui foram consultadas. A Tabela 2 apresenta a L

Quadro 1: Relação de Estudos Seleccionados na Pesquisa

Mineral/Rocha	Cultura	Solo	Qtd. de Aplicação	Duração	Tamanho da partícula	Tipo de teste	Resumo
Fonolito	Abeto	Marga glacial acidificada	10	5 anos	90<0.1mm	Campo	Melhor estado químico do solo com potássio efeito nutricional. Liberar e fornecer Ca/Mg. Liberação
Ultramáfica, Biotita xisto, Flogopita,	Alface	Argila arenosa	10,19,29; 3,5,8; 4,8,12; 14,27,41	71 dias	-	Cultura	Melhores resultados do solo ultramáficas e manganês; A eficiência agrícola maiores quant
Brecha	alho-poró	Areia de quartzo	Equivalente a 230 kg ha <sup>-1</sup> K	10 semanas	<0.1mm	Cultura	Biotita produz KCl próximo insignificante. Os minerais resultados em solos com lixiviação são a favor
Rocha de fosfato, Feldspato	Quiabo	Argila	-	2x 75 dias	-	Campo	Efeitos no comprimento Composto>feldspato/RP> giberélico aumentou o cre
Feldspato	Batata	Solo arenoso pobre	714 kg/ha	-	-	Campo	½ Ksp + ½ K sulfato produz químicos da planta, Ksp so alta qualidade. Ec
Feldspato, zinnwaldita, mica	cevada primaveril	Areia de quartzo	139-820 mg K por penal (4kg solo)	6 semanas	~75% 2-63 µm, 15%<2 µm, 10%>63 µm	Cultura	Todos os tratamentos aume biomassa total da planta zinnwaldita>mica>feldspato aumentaram significativam mica limitado devido a
Rochas de basalto vulcânicas	Milho, cana-de-açúcar, arroz de mandioca	Argila arenosa	2-3	60 meses	-	Campo	Maior rendimento (aumentada capacidade de retenção de fertilizantes comerciais, socioeconômico
Basalto	Tremoço, Estupro, Banana, Milho	Solução nutritiva	-	36 dias	100- to 200- µm	Cultura	A taxa de intemperismo foi 5x) na presença de plantas intemperismo constantemente

Ksp, PR +	fava	solo arenoso	478 kg/ha	162 dias	<2mm	Campo	O material orgânico + Ksp aumentou a eficiência do uso que o químico, composto solo NPK, sem resultados
material orgânico	beterraba sacarina	Solo arenoso calcário	0, 40, 80	Duas temporadas	<2mm	Campo	Ksp aumentou várias características de nutrientes, resultados superiores composto. Carga ambiental que a poeira
Feldspato	Oliveira	Areia e aquaponia	120 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup>	80 dias	0.250 mm	Cultura	Adubação com K solúvel hidropônicos. Extraíbilic aumentada usando ácidos e outros fertilizantes
Arenito Glauconítico	grama do Sudão	Alfisol	400g por 2,5L de areia, 400g por 10L	6 meses	<2mm	Cultura	Resíduos de mica e KSP biomassa e Kuptake. Mica + ou K
Poeira vulcânica	Azevém	Areia	8% do peso fresco do esterco	5 meses	-	Campo	A adição de farinha de pedra NH <sub>3</sub> (redução significativa) Aumento da recuperação pela poeira
Feldspato	-	Composto sozinho	7g por 100g	-	>70% 63-2 µm	Cultura	Pó de rocha misturado significativamente as variedades de compostos. Afetadas. Poeiras de rocha c tiveram melhores resultados
Granito	Melância	Areia (90%)	0, 2,5, 5	60 dias	90% areia	Cultura	RD acelerou a floração, população
Biotita, feldspato	Tomate	Ácido, suscetível a doenças	10g por kg de solo	50 dias	<2mm	Cultura	O tratamento RD + orgânico melhorar as atividades enzimáticas de murcha bacteriana, aumento produção de biomassa. RD orgânico comercial
Granito (principalmente Mica)	Azevém	Areia argilosa ácida	25 / 50 /100 g/kg <sup>1</sup>	3 meses	80% < 2-50µm	Cultura	A produtividade das plantas aplicação. Aumento da absorção CEC do solo e redução

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022)

## DISCUSSÃO

Previamente, importante salientar que os estudos observados apresentaram em grande escala as deficiências de micronutrientes e fertilizantes em ambientes tropicais, fundamento que se elenca inicialmente ante às caracterizações de benefícios. Nesse horizonte, a geoquímica para sistemas de solo laterítico, comum em regiões tropicais – tal como o Brasil, muitas vezes mostra um esgotamento dramático de praticamente todos os nutrientes quando comparado a outros sistemas de solo (HELLAL et al., 2019).

Esses solos (latossolos) representam ambientes lixiviados de nutrientes, muitas vezes reduzidos a água e alguns hidróxidos e óxidos insolúveis de Fe, Al e metais raramente mais raros. Os fertilizantes solúveis convencionais, como o NPK, foram projetados para solos com alto teor de nutrientes e alta capacidade de troca iônica do hemisfério norte, mas não podem ser retidos pelos sistemas lateríticos ricos em óxidos de Fe e Al. Consequentemente, sob condições de excesso de chuva, eles podem ser desperdiçados e, assim, poluir o meio ambiente. Para além, fertilizantes NPK não fornecem variável de macro/micronutrientes que seriam necessários para repor o equilíbrio de nutrientes do solo presente em solos férteis (HELLAL et al., 2019).

O uso prolongado de fertilizantes químicos em campos de cultivo contínuo levou a um excesso de macronutrientes e a deficiências de micronutrientes no solo. A oferta restrita de micronutrientes como cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) é uma restrição comum para a agricultura em todo o mundo, especialmente para a agricultura orgânica, onde a entrada de fertilizantes químicos é amplamente restrita. Essas deficiências de nutrientes enfraquecem o sistema solo-planta, diminuem o rendimento e a qualidade das plantas e tornam as culturas mais vulneráveis a pragas e doenças (PFEFFER, 2013).

Embora a demanda das culturas por micronutrientes seja geralmente três magnitudes menor do que a de macronutrientes, a extensão dos solos deficientes em micronutrientes é semelhante à dos solos deficientes em N, P e K (LEONARDOS et al., 2017). A Tabela 1 resume os dados de 190 amostras de solo coletadas em 15 países, mostrando que 49% desses solos eram pobres em zinco e 31% eram pobres em boro. Os dados indicam que a extensão das deficiências mundiais de micronutrientes em solos agrícolas (de hortaliças) é preocupantemente grande, que é agravado pelo fato de que muitas cultivares modernas das principais culturas são altamente sensíveis a baixos níveis de micronutrientes e foram levantados nos estudos de White e Zasoski (2019), baseando-se em dados da Organização Mundial da Saúde, de Manuais dos Objetivos do Milênio e, por fim, e da *International Organization for Sustainable Development*. O indexo A significa solos pobres em nutrientes, mas não responsivos devido a fator limitante.

Tabela 1: deficiências mundiais de micronutrientes em solos agrícolas (Hortaliças)

Estimativa de Deficiência	Nutriente								
	N	P	K	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	%								
Agudo	71	55	36	10	4	0	1	3	25
Latente <sup>A</sup>	14	18	19	21	10	3	9	12	24
Total	85	73	55	31	14	3	10	15	49

Fonte: Adaptado de White e Zasoski (2019)

Além disso, a eficiência de uso de fertilizantes solúveis em ambientes tropicais é de aproximadamente 50% para N, 10-15% para P e 40% para K no ano de aplicação. A indústria de fertilizantes químicos está ciente dessa situação e se esforça para produzir fertilizantes menos solúveis e mais eficientes para as plantas. A tendência é mudança de fertilizantes de 'liberação rápida' para 'liberação lenta', em que produtos como uréia revestida com enxofre e fertilizantes N revestidos com polímeros têm preços elevados e provavelmente não serão acessíveis para agricultores em países em desenvolvimento (WHITE; ZASOSKI, 2019).

Nesse campo, Shivay et al. (2020) e White; Zasoski (2019) criticam a predominância da prática de fertilizante convencional impulsionada pelo mundo industrial, alegando que estes, do tipo solúveis NPK foram inadequadamente adaptados aos sistemas de solos tropicais: solos glaciais e ricos em detritos rochosos do hemisfério norte, os fertilizantes atuais podem ter sido bem diferentes. Talvez o conceito de petrofertilizante estivesse bem estabelecido.

Existem preocupações econômicas e ambientais adicionais sobre fertilizantes químicos solúveis, como a produção intensa de energia, longas distâncias de transporte e preços que geralmente são inacessíveis para pequenos agricultores do Sul global (LI; DONG, 2019). Nesse contexto, fontes alternativas de nutrientes são urgentemente necessárias, principalmente em ambientes tropicais. Especialmente em países em desenvolvimento como é o caso do Brasil. A este sentido, cabe compreender o que a literatura assumiu quanto a relação entre o setor de hortaliças, agroecologia e uso de pós de rocha na rochagem.

A aplicação de práticas agrogeológicas no setor de hortaliças constitui forma de fornecer nutrientes e, principalmente, de melhorar a estrutura do solo. A agrogeologia em hortaliças é abordagem interdisciplinar que visa manter os agroecossistemas pelo estudo de processos geológicos e materiais rochosos naturais. Uma dessas técnicas é aplicar pó de rocha de silicato finamente moído (também conhecido como pó de rocha, farinha de rocha, farinha de pedra e petrofertilizantes) como uma correção do solo em solos agrícolas. Existem vários fertilizantes à base de rocha, tais como a rocha fosfática, rocha processada ou resíduos de carvão (VAN STRAATEN, 2022), mas ao longo deste estudo o termo pó de rocha é usado apenas para denotar rochas silicatadas não processadas e finamente moídas.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (2006, p. 92), um fertilizante é “um produto extraído, refinado ou manufaturado que contém um ou mais nutrientes vegetais essenciais em formas disponíveis ou potencialmente disponíveis e em valor comercial quantidades sem transportar qualquer substância nociva acima dos limites permitidos”. Van Straaten (2022) explica que um fertilizante no sentido mais estrito, e regulamentado pelas leis nacionais de fertilizantes, é solúvel com concentração total de nutrientes garantida e uma quantidade específica de componentes ativos. Não existe definição geral para correção do solo, mas geralmente se refere a qualquer material que é misturado ao solo para melhorar suas propriedades físicas e químicas. O pó de rocha não deve, portanto, ser concebido apenas como um fertilizante que aumenta as concentrações de nutrientes, mas também como uma correção do solo que melhora as propriedades físicas do solo.

Solos são formados pelo intemperismo de rochas primárias dos 18 elementos essenciais para o maior crescimento das plantas, exceto nitrogênio, todos derivados de rochas e minerais naturais. Esses nutrientes contidos nas rochas, no entanto, não estão prontamente disponíveis para as plantas, mas devem ser liberados através do intemperismo. Subsequentemente, o intemperismo contínuo do pó de rocha poderia remineralizar o solo com uma ampla gama de micro e macro nutrientes a longo prazo, enquanto os fertilizantes solúveis comercialmente disponíveis fornecem principalmente o solo com altos aportes dos principais macronutrientes N, P e K (VAN STRAATEN, 2022).

A pesquisa científica agrícola com rochas finamente moídas e rochas não processadas quimicamente remonta a 1853/54 (Missoux) e ao trabalho de Hensel (1894), que introduziu o conceito de pão de pedras. Foi retomada pelo trabalho de Keller (1948) e Keller et al. (1963), ainda no período clássico, ganhando cada vez mais observações nos últimos anos. A aplicação de pó de rocha como corretivo do solo recebeu interesse renovado nos últimos anos devido aos avanços na compreensão dos processos geológicos e meteorológicos, ciclagem de nutrientes e processos bioquímicos no sistema do solo (VAN STRAATEN, 2022).

A aplicação de pó de rocha visa imitar processos geológicos naturais, que em periódico restauram nutrientes em solos lixiviados e degradados (LEONARDOS et al., 2017). Durante as eras glaciais, as geleiras esmagaram rochas em seu caminho e criaram poeira de rocha fina ou *loess*, que foi posteriormente levada para todo o mundo. Hoje em dia, os solos loess constituem a base da agricultura altamente produtiva da China, Europa Oriental e América do Norte. Áreas onde minerais vulcânicos frescos intemperizados são muito férteis, como é com áreas vulcânicas jovens em Java, Costa Rica e Havaí, enquanto áreas tropicais mais antigas e

altamente intemperizadas no Brasil, partes da África e Austrália têm solos pobres e deficientes em minerais (VAN STRAATEN, 2022).

Além disso, a aplicação de pó de rocha é sustentada pelo reconhecimento de que a produtividade do solo não é alcançada apenas pelo aumento da concentração de nutrientes, mas também pela melhoria da estrutura do solo e redução das perdas do solo (LEONARDOS et al., 2017). As condições químicas do solo são vezes mais fáceis de melhorar do que as físicas e as propriedades físicas adequadas do solo são uma pré-condição para otimizar a nutrição das plantas. As propriedades físicas do solo incluem a profundidade, estrutura, textura e espaço poroso com água ar. Um dos principais objetivos de se ter propriedades físicas adequadas para o solo é proporcionar um ótimo suprimento de água e aeração, bem como ambiente favorável para que as raízes cresçam, proliferem e absorvam nutrientes (FAO, 2006).

No entanto, apesar de mercado bem estabelecido com diversos produtos, as evidências científicas sobre a eficácia do pó de rocha são contraditórias. Há relatos de resultados positivos quanto ao rendimento das plantas (GUELFIL-SILVA *et al.*, 2013; MOHAMMED et al., 2014), manejo de pragas (LI E DONG, 2013), reutilizando resíduos de pedreira disponíveis localmente (SILVA et al., 2015; SILVA et al., 2013), sequestrando gases de efeito estufa (SHAH et al., 2022; PFEFFER, 2013) e geralmente melhorando o solo e as plantas condições químicas (MOHAMMED et al., 2014)), enquanto outros atribuem ao pó de rocha pouco ou nenhum potencial agrônômico (HELLAL et al., 2013; KARIMI et al., 2022).

Preocupações/resultados insignificantes sob eficácia do pó de rocha estão relacionados à baixa solubilidade, uma vez que a eficácia de fornecer nutrientes está indispensavelmente ligada ao intemperismo das partículas de rocha no solo (GUELFIL-SILVA *et al.*, 2013). Além disso, é difícil determinar dosagens exatas ou relações causa-resposta, uma vez que os materiais rochosos apresentam efeitos lentos ou retardados (WHITE; ZASOSKI, 2019). Mas, sobretudo, considerações podem ser realizadas em face dos tipos de rocha usadas, alterações de pó de rocha e combinações com outros materiais, solos e clima, os aspectos econômicos, transporte e requisitos de energia, fornecimento e renovação e também efeitos negativos e solidez ambiental. Estes são evidenciados em frente.

No geral, o objetivo deste estudo foi fornecer base teórica à aplicação de pó de rocha em hortaliças e revisar ensaios científicos para determinar se o pó de rocha pode ser considerado um corretor de solo adequado para uma horticultura mais sustentável. Na natureza, solos lixiviados ou degradados são restaurados e rejuvenescidos periodicamente por detritos rochosos ricos em nutrientes, leite glacial, erupções vulcânicas e inundações sazonais. Segundo Leonardos et al. (2017), seria um passo lógico para o homem agir como uma força geológica e

repor os nutrientes perdidos ou ausentes adicionando rochas moídas ao invés de fertilizantes químicos. Se rochas de silicato ricas em nutrientes fossem aplicadas com composto, requisitos da planta a micro e macronutrientes deveriam teoricamente ser atendidos (WHITE; ZASOSKI, 2019). Em relação ao contínuo esgotamento de nutrientes em solos agrícolas, juntamente com crescentes preocupações relacionadas à aquisição, produção e solidez ambiental de fertilizantes sintéticos solúveis, especialmente em ambientes de solo altamente intemperizados, a consideração do pó de rocha como correção do solo de horticultura parece ser bem justificada (WHITE; ZASOSKI, 2019).

Há uma série de empresas comerciais em negócios de longa data com clientes satisfeitos, especialmente no setor de horticultura. No entanto, as evidências científicas sobre a verdadeira eficácia são dispersas e contraditórias, principalmente devido à lenta solubilidade das rochas no solo (MANNING, 2020). As interações dentro dos solos entre os sistemas planta-raiz, a microflora microbiana, a matéria orgânica e os minerais são muito complexos e difíceis de comparar. Além dos processos mineralógicos e geoquímicos bem pesquisados, Atungwu *et al.*, 2014 observam que vias e reações limitantes de velocidade que controlam o fluxo de nutrientes da rocha para a raiz são pouco compreendidas pela maioria dos cientistas do solo e agrônomos. No entanto, os processos de intemperismo dentro dos sistemas solo-planta têm sido amplamente subestimados e, ao contrário do que se supõe há muito tempo, os materiais rochosos devem ser considerados como fonte potencial de nutrientes que podem contribuir com uma proporção substancial para a fertilidade do solo (GUELFILVA *et al.*, 2013).

De acordo com a dada complexidade deste campo e a inconsistência dos ensaios, é evidente que uma ampla comparação e resultados inferidos devem ser generalizados. A forma como o pó de rocha é aplicada ou incorporada ao solo é muito individual, muitos ensaios controlados em estufas não são comparáveis aos ensaios de campo e a fertilização adicional não é relatada de maneira uniforme. A extensão em que fatores podem ser extrapolados é, portanto, limitada, mas é possível destacar alguns fatores relevantes e correlações perceptíveis, tais como o tipo de rocha (ATUNGWU *et al.*, 2014).

Nesse horizonte, a pesquisa relata que basalto e outras rochas vulcânicas tiveram bom desempenho quando aplicados em ambientes tropicais em quantidades de aplicação de 2 a 20 t/há (NSINGER *et al.*, 2021; LEONARDOS *et al.*, 2017). Rochas de granito tiveram resultados variáveis, os efeitos positivos incluíram principalmente neutralização ácida favorável bem como aumento da absorção de K. Em alguns ensaios (SILVA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2013). o granito foi capaz de fornecer quantidades significativas de Mg e Ca e aumentar o rendimento das plantas. Os resultados positivos para o granito podem ter implicações importantes para o

reaproveitamento do pó de estéril da indústria do granito, uma vez que o descarte de grandes volumes é um problema sério para as empresas produtoras e até o momento não existe um método viável de reaproveitamento do produto (SILVA et al., 2015; SILVA et al., 2013).

Rochas de biotita e nefelina produziram resultados semelhantes como tratamentos equivalentes de KCl (GUELFY-SILVA *et al.*, 2013; MOHAMMED et al., 2014). Eles superaram principalmente o K-feldspato quando comparados no mesmo estudo, que está relacionado à taxa de dissolução muito mais alta da biotita e da nefelina, em pelo menos duas ordens de magnitude em comparação com o K-feldspato em pH quase neutro (HELLAL *et al.*, 2019; MADARAS *et al.*, 2022). Resultados do feldspato variaram de efeitos médios a promissores, especialmente em vários ensaios no Egito, onde a rocha foi frequentemente aplicada (KARIMI *et al.*, 2022; PFEFFER, 2013) em combinação com todos os corretivos orgânicos e onde K é frequentemente o único fator limitante para o crescimento das plantas.

Outro fator relevante são alterações de pó de rocha e combinações com outros materiais. Uma prevalência significativa de resultados positivos foi obtida quando rochas foram aplicadas com composto, esterco e bactérias específicas ou se foram aciduladas antecipadamente. As taxas de dissolução são dependentes do pH, e a liberação de cátions nutrientes é rápida em ácidos e bases fortes (PFEFFER, 2013).

Abdel-Mouty and El-Greadly (2018) confirmaram a dissolução mais rápida de rochas na presença de plantas superiores do que previamente calculado com base em estudos geoquímicos em massa. Isso é presumivelmente causado pela liberação de prótons e ácidos orgânicos das raízes e microrganismos encontrados na matéria orgânica. As raízes das plantas podem reduzir rapidamente o pH da solução da rizosfera em duas ou mais unidades, o que influencia consideravelmente os mecanismos de intemperismo. Além disso, a alteração das partículas de rocha por moagem de alta energia aumentou muito sua eficácia, o que pode ser atribuído a um aumento na área superficial específica e a um desordenamento estrutural da estrutura mineral (SHAH *et al.*, 2012). Alterações de rochas/cominações com outros materiais indicam que tarefa chave é descobrir mecanismos biogeoquímicos que melhorem a liberação de nutrientes da matriz mineral (ABDEL-MOUTY; EL-GREADLY, 2018).

Quanto ao fator de solos e clima, os resultados confirmaram a adequação do pó de rocha para ambientes quentes e úmidos. Solos altamente intemperizados em ambientes tropicais são comumente caracterizados por um pH baixo, o que favorece a dissolução mineral. Além do pH, os minerais tendem a se dissolver mais rapidamente à medida que a temperatura aumenta, o que é causado por considerações de energia de ativação (LEONARDOS et al., 2017; HINSINGER et al., 2021; HELLAL et al., 2019; HELLAL et al., 2013). Ambientes tropicais também podem

apresentar taxas de precipitação mais altas, o que também favorece a dissolução de silicatos (LABIB et al., 2022; MADARAS et al., 2022; LEONARDOS et al., 2017; HINSINGER et al., 2021; HELLAL et al., 2019; HELLAL et al., 2013).

Essas características também estão em diversos achados – subscritos acima –, que argumentam que ambientes úmidos e quentes com um pool limitado de cátions facilmente intempéris são mais adequados para a dissolução de silicatos. Quanto à escala da maioria dos ensaios relatados, o potencial de sequestro de carbono está bem abaixo do que seria considerado geoengenharia. No entanto, a calagem é uma prática agrícola comum e, como o pó de rocha pode melhorar o pH do solo da mesma forma, além de sequestrar CO<sub>2</sub>, fornecer nutrientes e, na melhor das hipóteses, ser gratuito se obtido como resíduo, ele aparece como uma alternativa conveniente (LABIB et al., 2022; MADARAS et al., 2022; LEONARDOS et al., 2017; HINSINGER et al., 2021; HELLAL et al., 2019; HELLAL et al., 2013).

Conforme já descrito, os solos ricos em nutrientes em zonas de clima moderado do hemisfério norte são geralmente ricos em minerais argilosos de alta capacidade de troca iônica e podem, portanto, se beneficiar de fertilizantes químicos solúveis, enquanto a capacidade de troca iônica de solos tropicais solos é bastante pobre e, portanto, limita a capacidade de armazenar nutrientes para as plantas. A aplicação de pó de rocha não apenas forneceria nutrientes por um período mais longo, mas também melhoraria a capacidade de troca iônica dos solos, formando novos minerais argilosos capazes de anexar nutrientes disponíveis às plantas. No julgamento de Mohammed et al. (2014), foi confirmado que as rochas de silicato tiveram melhor desempenho em solos com baixa capacidade de troca iônica

Redução de doenças  
O pó de rocha reduziu doenças em tomates e melancias, fortalecendo a própria planta (LI E DONG, 2013; ATUNGWU *et al.*, 2014). A deficiência de micronutrientes enfraquece a planta e, portanto, aumenta sua suscetibilidade a doenças, enquanto plantas saudáveis desenvolvem uma resistência natural. Outro mecanismo importante é o aumento do pH do solo induzido pelo pó de rocha de ácido para neutro (LI E DONG, 2013), uma vez que nutrientes específicos ficam bloqueados em certos níveis de pH. Solos ácidos são propensos a deficiências de K, Ca, Mg e Mo, enquanto solos alcalinos podem apresentar deficiências de Fe, B, Mn, Zn e Cu. Isso também pode explicar os efeitos favoráveis do pó de rocha nos solos ácidos, deficientes em K, Ca e Mg em alguns dos ensaios egípcios. Frete a isto, avalia-se o caso das questões socioambientais, também significativamente presentes.

Guelfi-Silva et al. (2013) afirma que a viabilidade de aplicação do pó de rocha é semelhante à do calcário, e depende principalmente da distância do local de transporte até a fazenda. A mineração em pedreiras é tipicamente indústria centralizada com poucos operadores

locais de pequena escala. O desenvolvimento agromineral em pequena escala parece ser um negócio promissor para os países em desenvolvimento que ganha importância adicional se se considerar a monopolização da potassa. Outros estudos consideraram o uso de pó em hortaliças como fator de vantagem competitiva no mercado (SHAH et al., 2012; ATUNGWU et al., 2014; LI; DONG, 2013; SILVA et al., 2013; PFEFFER, 2013).

Por fim, quanto ao fornecimento e Renovação, minerais constituem materiais finitos e, portanto, não podem ser considerados renováveis. No entanto, as rochas estão entre os recursos mais abundantes do planeta e não é provável que ocorra uma escassez em qualquer taxa realista de aplicação nas próximas décadas. Além disso, a maioria das rochas usadas atualmente para fins agrícolas é obtida de pedreiras onde é um subproduto inevitável da fabricação de agregados. O descarte constitui um problema sério e cerca de 5% dos finos minerais resultantes seriam adequados para a melhoria do solo e o uso em hortaliças implicaram em menor impacto ambiental (PFEFFER, 2013). Dito isto, em frente, apresentam-se as considerações finais em face da pesquisa aqui elencada.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A aplicação de pó de rocha produziu resultados variados e as poucas contradições sobre sua eficácia como melhorador do solo foram confirmadas. O intemperismo da rocha e, portanto, sua eficácia depende de variedade de fatores e interações específicas do local que, no momento, não são universalmente compreendidos com base nas pesquisas observadas. Além disso, esta revisão é limitada pela falta de consistência quanto ao desenho dos estudos e pela singularidade fatorial de cada ensaio. Como uma grande variedade de materiais diferentes é vendida como “pó de rocha” ou “fertilizante de rocha”, nenhuma conclusão geral pode ser feita. Foi possível, no entanto, delinear alguns fatores e condições específicos sob os quais o pó de rocha se mostrou à prova de produzir resultados benéficos.

Ensaio sugerem que a eficiência é melhor em locais onde seria mais necessária, ou seja, em regiões tropicais com solos intemperizados e altamente empobrecidos de nutrientes, onde os fertilizantes convencionais raramente são acessíveis e estão ligados a eficiências de uso em declínio no caso de hortaliças.

Uma avaliação geral de sua sustentabilidade é difícil, mas o pó de rocha pode ser visto como ambientalmente benigno e não é provável que ocorra uma escassez de oferta em qualquer taxa realista de aplicação. As considerações econômicas são dependentes do local e dentro do paradigma agrícola de hortaliças atual não são a favor de uma técnica como a aplicação de pó

de rocha. Isso ocorre porque a abordagem econômica convencional e simplificada apenas leva em consideração a entrada de fertilizantes e a produção de rendimento em uma escala de tempo curta. O pó de rocha, no entanto, não visa apenas aumentar tão somente o rendimento, mas melhorar e manter as condições do solo a longo prazo, o que está sob a abordagem econômica predominante difícil de quantificar.

Os solos são um recurso não renovável considerando a escala de tempo das atuais discussões sobre sustentabilidade. Um solo saudável é a base para uma agricultura sustentável e valerá a pena a longo prazo, enquanto base de terra degradada desdobrará continuamente seus custos ocultos até o ponto de infertilidade. A revisão provou que pó de rocha é definitivamente capaz de atuar como um melhorador do solo com uma ampla gama de benefícios relatados. A tarefa para pesquisas futuras é, portanto, enfatizar ensaios consistentes que permitam uma comparação clara e compreensão dos fatores e mecanismos envolvidos.

Além disso, é improvável no estado atual que os empreendedores do setor de hortaliça apliquem rochas sem orientação e sem os subsídios abrangentes. A cooperação entre cientistas e agricultores, bem como conhecimentos em biologia e mineralogia, são necessários para avaliar a praticidade do pó de rocha e entender completamente os mecanismos de intemperismo. Embora tais ensaios exijam investimentos substanciais em termos de tempo, o esgotamento contínuo dos nutrientes do solo como uma das principais razões da insegurança alimentar global, combinado com as crescentes preocupações com a situação atual dos fertilizantes, justificam mais exames e investimentos neste campo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALEXANDRATOS, N. E BRUINSMA, J. **Agricultura mundial para 2030/2050: a revisão de 2012**. Documento de trabalho da ESA, 2012.

ATUNGWU, J.J. et al. Influência da remineralização do solo à base de pó de rocha na doença das galhas de plantas orgânicas de melancia, **Arquivos de Fitopatologia e Proteção de Plantas**, v. 47, n. 12, pp. 1489-1496, 2014.

CAKMAK, I. Pesquisa em nutrição de plantas: Prioridades para atender às necessidades humanas de alimentos de forma sustentável. **Planta e Solo**, Vol. 247, pp. 3-24, 2022.

FAO. **Nutrição de plantas para segurança alimentar: Um guia para manejo integrado de nutrientes**, 2006. ISBN: 92-5-105490-8, 2016.

GREENHALGH, T; PEACOCK, R. Effectiveness and efficiency of search methods in systematic reviews of complex evidence: audit of primary sources. **BMJ**, No. 331, pp. 1064–1065, 2015

GUELFÍ-SILVA, D. R. et al. Eficiência agronômica da adubação potássica em alface adubada com fontes alternativas de nutrientes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, pág. 267-277, 2013.

HELLAL, F. A. et al. Efectos de la fuente natural de potasio enriquecida con compost sobre la absorción de nutrientes y el rendimiento de la remolacha azucarera cultivada en suelos recién recuperados. **Middel East Journal of Agriculture Research**, v. 2, n. 3, págs. 101 a 107, 2013

HELLAL, F. A. et al. Influencia de las enmiendas orgánicas en la disponibilidad y absorción de nutrientes por plantas de haba fertilizadas con fosfato de roca y feldespato. **Americano-euroasiático J. Agric. & Medio Ambiente. Sci.**, v. 6, n. 3, págs. 271–279, 2019.

HENSEL, J. **Bread from stones**. TAFEL AJ (Ed), Philadelphia, USA, 1984.

HINSINGER, P. et al. Meteorización inducida por plantas de una roca basáltica: evidencia experimental. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, vol. 65, págs. 137–152, 2021.

IAASTD. **Agricultura na encruzilhada**: Resumo global para tomadores de decisão. Avaliação Internacional do Conhecimento Agrícola, Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento. Island Press, Washington, DC. Relatórios acordados em uma Sessão Plenária Intergovernamental, Joanesburgo, África do Sul, 2009.

KARIMI, E., et al. El potencial de la arenisca glauconítica como fertilizante de potasio para las plantas de olivo. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 58 n. 9, págs. 983–993, 2022.

KELLER, W.D. Rocas nativas y minerales como fertilizantes. **Sci Mensual**, vol. 66, págs. 122–130, 1948.

LEONARDOS, O. H. et al. **Remineralización para una agricultura sostenible**: una perspectiva tropical desde un punto de vista brasileño”, Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 56, pp. 3–9, 2017.

MADARAS, M., et al. Waste silicate minerals as potassium sources. A greenhouse study on spring barley. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 59, n. 5, pp. 671–683, 2022.

MANNING, D. A. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 30, n. 2, pp. 281–294, 2022.

MOHAMMED, S. M. O. et al. Comparison of silicate minerals as sources of potassium for plant nutrition in sandy soil. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 5, pp. 653–662, 2017

PFEFFER, E. Einfluss von Gesteinsmehl auf die Emission von treibhausrelevanten Spurengasen aus Kompost. **Master Thesis**, BOKU Wien, 2013.

SHAH, G.M. et al. A irrigação e o uso de farinha de lava reduzem a emissão de amônia e melhoram a utilização de N quando o esterco sólido de gado é aplicado em pastagens. **Agricultura, Ecosistemas e Meio Ambiente**, v. 160, pp. 59–65, 2012

SHIVAY, Y.S., KROGSTAD, T. e SINGH, B.R. Mineralização de cobre, manganês e zinco a partir de farinha mineral de rocha e composto de resíduos urbanos para uso eficiente na agricultura orgânica. **Planta e Solo**, n. 326, págs. 425–435, 2022

SILVA, B. et al. Efeito da adição de pó granítico a um solo ácido da Galiza (NW Espanha) em comparação com a cal. **Ciências Ambientais da Terra**, vol. 68 No. 2, pp. 429-437, 201.

SILVA, B. M. T., et al. Reutilização de pó de granito como corretivo e fertilizante para solos ácidos. **Chemosphere**, v. 61, n. 7, pp. 993-1002, 2015.

VAN STRAATEN, P. **Rocks for crops**: Agrominerals of sub-saharan Africa, ICRAF, Nairobi, 2022.

WHITE, J.G.; ZASOSKI, R. J. **Mapping soil micronutrientes**. Field Crops Research, Vol. 1999 No. 60, pp. 11–26, 2019.