

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE PLANALTINA**

**Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA)**

**COMPOSTAGEM CONJUNTA DE RESÍDUOS  
ORGÂNICOS E ROCHAS MOÍDAS NA  
CAFEICULTURA: VIDA NOVA PARA A TERRA**

**PEDRO HÖFIG**

**ORIENTADOR: EDER DE SOUZA MARTINS**

**PLANALTINA/DF, NOVEMBRO 2023**

**Pedro Höfig**

**COMPOSTAGEM CONJUNTA DE RESÍDUOS  
ORGÂNICOS E ROCHAS MOÍDAS NA  
CAFEICULTURA: VIDA NOVA PARA A TERRA**

Tese apresentada ao curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), da Faculdade UnB de Planaltina (FUP), da Universidade de Brasília (UnB), como requisito para o título de Doutor.

**Orientador:** Prof. Dr. Eder de Souza  
Martins

**Planaltina/DF  
2023**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE PLANALTINA**

**Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA)**

**COMPOSTAGEM CONJUNTA DE RESÍDUOS  
ORGÂNICOS E ROCHAS MOÍDAS NA  
CAFEICULTURA: VIDA NOVA PARA A TERRA**

**Comitê examinador**

**Eder de Souza Martins – Embrapa Cerrados  
(orientador)**

**Rodrigo Studart Correa – Universidade de Brasília  
(examinador interno)**

**Elvio Giasson – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
(examinador externo)**

**Giuliano Marchi – Embrapa Cerrados  
(examinador externo)**

**PLANALTINA/DF, NOVEMBRO 2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com  
os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Hc

Höfig, Pedro

Compostagem conjunta de resíduos orgânicos e rochas  
móidas na cafeicultura: vida nova para a terra / Pedro  
Höfig; orientador Eder de Souza Martins. -- Brasília, 2023.

159 p.

1. Compostagem. 2. Pó de rocha. 3. Remineralizador. 4.  
Cafeicultura. I. de Souza Martins, Eder, orient. II. Título.

**Dedico:**

Lucas e Marina: semente e esperança

Julia: flor e paixão

Pai e mãe: raiz e origem.

Ao meu eterno e insubstituível amigo Glauco, que, por motivos não compreendidos por nós, nos deixou tão cedo. Você faz muita falta.

## **Agradecimentos**

À UnB, por ser pública e pelo comprometimento com a ciência;

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite e colaborarem com o crescimento deste trabalho;

Ao meu orientador, que, com respeito e sensibilidade, percebeu meus interesses e necessidades, me apoiou e orientou verdadeiramente, compartilhando parte de seus conhecimentos;

À Agropecuária AH, pelo apoio institucional e, principalmente, à equipe da Fazenda Ouro Verde, personalizada por Gildo, Noel, Gabriela, senhor Jonas e meu filho, Lucas, pela ajuda na condução dos experimentos;

Aos trabalhadores e trabalhadoras rurais que nos inspiram e constroem esse país com suor, sangue e sentimento: solo fértil e água viva para que realizem seus sonhos e lutas;

Aos agricultores, convencionais ou não, que acreditam estar no caminho certo para livrar a humanidade da fome;

Ao senhor Antônio Teixeira, por difundir o conhecimento sobre compostagem em propriedades rurais no Brasil;

Aos amigos do futevôlei do Minas Brasília Tênis Clube, um doce refúgio;

Ao Sport Club Corinthians Paulista, por me mostrar a força do povo, da diversidade e da classe trabalhadora, por me ensinar a sofrer e dar a volta por cima;

Ao meu pai, a minha mãe e ao meu irmão, de onde venho.

Aos meus filhos, fonte de inspiração e meu maior propósito, por renovarem a cada dia a esperança de um mundo mais justo e solidário.

Julia, exemplo de competência em tudo que faz, agradeço por sua dimensão poética da vida.

Nem que faça um tempo ruim...

“E fazem de tudo pra silenciar a batucada dos nossos tantãs”

Grupo Fundo de Quintal

## Sumário

Resumo .....	10
Abstract.....	11
Lista de figuras .....	12
Lista de tabelas .....	13
Lista de siglas .....	14
<b>1- INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1- AGRICULTURA INDUSTRIAL .....	18
2.2 - FONTES REGIONAIS DE NUTRIENTES .....	24
2.2.1 - Rochagem e Remineralizadores.....	25
2.2.2 - Compostagem .....	36
2.2.3 - Compostagem conjunta de materiais orgânicos e rochas moídas.....	43
<b>3- HIPÓTESES .....</b>	<b>46</b>
<b>4- OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>47</b>
4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	47
<b>CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE UM FERTILIZANTE PRODUZIDO POR COMPOSTAGEM CONJUNTA DE MATERIAIS ORGÂNICOS E ROCHAS MOÍDAS .....</b>	<b>48</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>61</b>
<b>CAPÍTULO II - EFEITOS DE DIFERENTES PROPORÇÕES DE ROCHAS MOÍDAS NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM.....</b>	<b>63</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
<b>CAPÍTULO III – DIFERENTES ROCHAS MOÍDAS NA COMPOSTAGEM EM UNAÍ/MG: FERTILIZANTE ORGÂNICO E AUTONOMIA AGRÍCOLA .....</b>	<b>77</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>80</b>

<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	86
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	95
<b>CAPÍTULO IV - COMPORTAMENTO DOS SOLOS, PRODUÇÃO DE CAFÉ E QUALIDADE DA BEBIDA EM DOIS DIFERENTES SISTEMAS DE ADUBAÇÃO USANDO FONTES REGIONAIS E CONVENCIONAIS DE NUTRIENTES</b> .....	96
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	98
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	100
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA .....	101
2.2 SISTEMAS DE ADUBAÇÃO .....	104
2.3 ANÁLISE DOS SOLOS DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS .....	111
2.4 PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DA BEBIDA .....	113
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	115
3.1 SOLOS.....	115
3.2 PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DA BEBIDA .....	120
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	122
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	123
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	127

## Resumo

A cafeicultura tem histórica relevância geopolítica e econômica no Brasil. O caminho técnico e químico da agricultura industrial passou por um desenvolvimento extraordinário, com a ajuda de enorme aparato, tanto da ciência quanto da indústria química e tecnológica. Entretanto, como consequência da agricultura industrial, ao longo do tempo notou-se uma redução da renda por unidade produzida, já que o produtor rural usualmente se depara com setores concentrados ou oligopolizados para a compra de seus insumos e precisam vender seus produtos com preços formados pela livre concorrência. Ademais, é evidente que, baseados em recursos finitos, nutrientes essenciais em algum momento não estarão mais disponíveis para a agricultura convencional. Nesse sentido, na presente pesquisa foram realizados quatro estudos com o uso de composto feito com resíduos orgânicos produzidos na própria propriedade utilizando pós de rochas disponíveis regionalmente. No primeiro estudo avaliou-se a qualidade de um fertilizante produzido com a compostagem conjunta de resíduos orgânicos e pós de rochas. No segundo, analisou-se o efeito dos diferentes teores de rochas moídas na compostagem e no produto final. Já no terceiro, comparou-se o resultado de três diferentes pós de rochas no processo de compostagem e no fertilizante orgânico produzido. Por fim, pesquisou-se o comportamento dos solos, da produção e da qualidade da bebida em dois sistemas de adubação em uma lavoura cafeeira em Unaí, noroeste do estado de Minas Gerais, no Cerrado Brasileiro: um utilizando adubação convencional e outro com uso de fertilizantes baseados em Fontes Regionais de Nutrientes (FRN). No primeiro estudo, as análises química, orgânica, biológica e sanitária indicaram que o processo de compostagem foi realizado de forma correta. Com isso, o composto exibiu a maioria das garantias mínimas para ser enquadrado como fertilizante orgânico composto classe A, o que pode melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo, aumentando a autonomia do agricultor. No segundo estudo constatou que adições de mais que de 30% de pó de rocha atrapalhou o operacional e o desenvolvimento biológico da compostagem. Na terceira pesquisa, notou-se que a compostagem foi eficiente em todos os tratamentos, demonstrada pela caracterização da fase termofílica e ausência de coliformes totais e de germinação de plantas espontâneas no produto final. O tratamento com micaxisto apresentou a menor diminuição relativa de potássio entre as matérias-primas originais e o produto final, indicando uma melhor relação entre custo e benefício. Por fim, o sistema de adubação com FRN, quando comparado com o sistema de adubação convencional, alcançou resultados superiores na função de suprimento de nutrientes, também ocasionando melhor qualidade de bebida de café.

Palavras chave: Fertilizante orgânico; Autossuficiência; Produção de café; Agrominerais silicáticos; Remineralizador; Recursos locais.

## Abstract

Coffee production has historical geopolitical and economic relevance in Brazil. The technical and chemical path of industrial agriculture has undergone extraordinary development, with the help of enormous apparatus from both science and the chemical and technological industry. However, as a consequence of industrial agriculture, over time, a reduction in income per unit produced was noted, as rural producers usually face concentrated or oligopolistic sectors to purchase their inputs and need to sell their products at lower prices formed by free competition. Furthermore, it is clear that, based on finite resources, essential nutrients will at some point no longer be available for conventional agriculture. In this sense, in the present research four studies were carried out using compost made with organic waste produced on the property itself and rock powders available regionally. In the first study, the quality of a fertilizer produced by composting organic waste and ground rocks was evaluated. In the second, the effect of different rock dust contents on composting and the final product was analyzed. In the third, the results of three different rock flours in the composting process and organic fertilizer were compared. Finally, the soil behavior, production and beverage quality of two fertilization systems in a coffee plantation in Unaí, northwest of Minas Gerais, in the Cerrado were researched: one with conventional fertilization and the other with the use of fertilizers based on Regional Sources of Nutrients. In the first study, chemical, organic, biological and sanitary analyzes indicated that the composting process was carried out correctly. As a result, the compound exhibited most of the minimum guarantees to be classified as a class A compound organic fertilizer, which can improve the physical, chemical and biological conditions of the soil, increasing the farmer's autonomy and reducing his dependence on fossil fuels. In the second work, it was found that values above 30% of rock dust hinder the operational and biological development of composting. In the third research, it was noted that composting was efficient in all treatments, demonstrated by the characterization of the thermophilic phase and the absence of total coliforms and spontaneous plant germination in the final product. The mica schist treatment showed the lowest relative decrease in potassium between the original raw materials and the final product, indicating a better relationship between cost and benefit. Finally, the FRN fertilizer system, when compared to the conventional fertilizer system, achieved superior results in the function of supply of nutrients. Furthermore, the FRN system achieved better coffee drink quality.

**Key words:** Organic Fertilizer; Self-sufficiency; Coffee Production; Silicate Agromineral; Remineralizer; Local Resources.

## Lista de figuras

Figura 1 - Fases da compostagem. Fonte: Dal Bosco <i>et al.</i> (2017).....	38
Figura 2 - Montagem das leiras. ....	53
Figura 3 - Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa com diferentes teores de rochas moídas. ....	66
Figura 4 - Temperaturas (C°) das pilhas ao longo do tempo.....	69
Figura 5 - Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa com diferentes rochas moídas.....	81
Figura 6 - Revolvimento e umidificação das leiras de compostagem .....	85
Figura 7 - Temperaturas das leiras ao longo do tempo (°C). Legenda: TF (fonolito); TM (micaxisto); TC (calcixisto).....	86
Figura 8 - Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa. ....	100
Figura 9 - Localização da fazenda Ouro Verde. ....	101
Figura 10 - Início do experimento implantado. ....	104
Figura 11 - Primeira adubação de cobertura no sistema convencional. ....	106
Figura 12 - Adubação de sulco no sistema com fontes regionais de nutrientes. ....	107
Figura 13 - Adubação do primeiro ano pós-plantio no sistema com fontes regionais de nutrientes. ....	108
Figura 14 - Adubação do primeiro ano pós-plantio no sistema convencional. ....	109
Figura 15 - Modelo dos IQSs FertiBio, Biológico e Químico e suas relações com as funções do solo (F1, F2 e F3) e respectivos indicadores obtidos por meio da análise do solo. Fonte: Mendes <i>et al.</i> , 2021.....	112
Figura 16 - Colheita manual dos cafeeiros na forma de derriça total no pano .....	113
Figura 17 - Secagem do café em terreiro suspenso. ....	114
Figura 18 - Especialista provando café.....	114

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Materiais utilizados na compostagem e suas proporções em peso seco.....	52
Tabela 2 - Caracterização química do composto orgânico.....	55
Tabela 3 - Determinação da composição orgânica do composto. ....	59
Tabela 4 - Resultados de atividades enzimáticas, quantificação de microrganismos e testes de germinação. ....	60
Tabela 5 - Relação C:N, densidade e teores de nutrientes totais das matérias primas utilizadas na compostagem. ....	67
Tabela 6 - Tratamentos contendo diferentes proporções de matérias primas para a produção de composto com adição de remineralizador.....	68
Tabela 7 - Caracterização química, física, orgânica e biológica dos compostos orgânicos produzidos com os diferentes tratamentos. ....	72
Tabela 8 - Materiais utilizados nos tratamentos de compostagem e suas participações percentuais no composto com base no peso seco. ....	82
Tabela 9 - Relação C:N, densidade e teores de nutrientes totais das matérias primas utilizadas na compostagem. ....	84
Tabela 10 - Características químicas, físicas, biológicas e sanitárias do composto de cada tratamento. ....	88
Tabela 11 - Padrão de referência de qualidade dos atributos do composto.....	91
Tabela 12 - Variação dos teores dos elementos químicos na matéria prima inicial e nos produtos finais. ....	93
Tabela 13 - Caracterização geral do solo da área de estudo antes da instalação do experimento. ....	102
Tabela 14 - Histórico de uso do solo na área do experimento.....	103
Tabela 15 - Composição dos compostos utilizados.....	105
Tabela 16 - Sistemas de adubações utilizados ao longo do experimento.....	106
Tabela 17 - Características dos compostos utilizados. ....	110
Tabela 18 - Características medidas três meses antes da colheita nos sistemas com Fontes Regionais de Nutrientes (FRN) e Fontes Convencionais de Nutrientes (FCN).116	
Tabela 19 - Medidas relacionadas à eficiência de produção dos sistemas FRN (Fontes Regionais de Nutrientes ) e FCN (Fontes Convencionais de Nutrientes). ....	120

## Lista de siglas

- ANOVA: Análise de Variância.
- As: arsênio.
- AF: ácido fúlvico.
- AH: ácido húmico.
- Aw: clima tropical com estação seca no inverno.
- B: boro.
- BioAS: Bioanálise de Solo.
- C: carbono.
- Ca: cálcio.
- CaO: óxido de cálcio.
- CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono.
- Cu: cobre.
- Cd: cádmio.
- CTC: capacidade de troca de cátions.
- DP: desvio padrão.
- Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- EUA: Estados Unidos da América.
- FCN: fontes convencionais de nutrientes.
- Fe: ferro.
- FRN: fontes regionais de nutrientes.
- FSSQ: fertilizante solúvel de síntese química.
- F1: função de clicar nutrientes.
- F2: função de armazenar nutrientes.
- F3: função de suprir nutrientes.
- GO: Goiás.
- Hg: mercúrio.
- H<sup>+</sup>: hídon.
- IAC: Instituto Agrônomo de Campinas.
- IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IQS: índice de qualidade do solo.
- K: potássio.
- KCl: cloreto de potássio.

- K<sub>2</sub>O: óxido de potássio.
- LQ: limite de quantificação.
- MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
- Mg: magnésio.
- MgO: óxido de magnésio.
- Mn: manganês.
- MOS: matéria orgânica do solo.
- MOT: matéria orgânica total.
- m%: saturação por alumínio.
- N: nitrogênio.
- Na: sódio.
- Ni: níquel.
- NMP: número mais provável.
- NPK: nitrogênio fósforo potássio.
- P: fósforo.
- Pb: chumbo.
- pH: potencial hidrogeniônico.
- PI: planta indicadora.
- PNF: paranitrofenil fosfato.
- PNG: p-nitrofenil-β-D-glicosídeo.
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: fosfato.
- RRA: rendimento relativo acumulado.
- S: enxofre.
- SENAR: Sistema Nacional de Aprendizagem Rural.
- Si: silício.
- SiO<sub>2</sub>: dióxido de silício.
- TC: tratamento com calcixisto.
- TF: tratamento como fonolito.
- TM: tratamento com micaxisto.
- T0: tratamento zero.
- T1: tratamento um.
- T2: tratamento dois.
- T3: tratamento três.
- T4: tratamento quatro.

- UFC: unidade formadora de colônia.
- V%: saturação por bases.
- Zn: zinco.

## 1- INTRODUÇÃO

A cafeicultura tem histórica relevância geopolítica e econômica no Brasil, já que moldou e ainda molda as diversas formas de apropriação e uso de nosso imenso patrimônio natural (IBGE, 2016), representando importante fonte de renda e empregos no país (DAVIS *et al.*, 2006). A produção de café é uma das principais atividades do setor rural brasileiro, sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial do produto há mais de um século e meio (COELHO, 2002), cultivado em 2,2 milhões de hectares (CONAB, 2021). Sua cadeia produtiva envolve aproximadamente 287 mil cafeicultores distribuídos em 1.900 municípios localizados em 15 estados brasileiros, gerando receitas e oportunidades no meio rural (MAPA, 2018).

Em 2022, o Brasil importou cerca de 83% de todos os fertilizantes utilizados (ANDA, 2023), dos quais a cultura do café consome aproximadamente 6% desses fertilizantes químicos, sintéticos e solúveis em água (FQSS), ficando atrás da soja, milho e cana de açúcar em quantidade consumida (KULAIIF; FERNANDES, 2010). Para adquirir tais produtos de fontes finitas (GLIESMANN, 2000; WISTINGHAUSEN, *et al.*, 2000) e que apresentam desvantagens em seu comportamento relacionados ao clima e solo tropical (LEONARDOS *et al.*, 2000), o produtor rural usualmente se depara com setores industriais e comerciais concentrados ou oligopolizados (PERES *et al.*, 2010).

Nesse sentido, a agricultura convencional moderna está associada à promoção dos pacotes tecnológicos das grandes empresas sobre as práticas agrícolas, na qual a submissão completa dos agricultores é o elemento central, por meio dependência de sementes, máquinas, agrotóxicos e adubos que reduzem o capital natural, de tal forma que os agricultores precisam vender seus produtos com preços formados pela livre concorrência, mas pagam seus insumos a preços formados por quem os vendem (STEENBOCK, 2021), transformando-se em mero consumidor de insumos agrícolas e serviços técnicos (CHO, 2018).

Contudo, movimentos de agricultura alternativos ao modelo convencional, contrapondo-se ao uso abusivo de insumos agrícolas industrializados, à dissipação do conhecimento tradicional e à deterioração da base social de produção de alimentos, têm tido um reconhecimento cada vez maior (ASSIS; ROMEIRO, 2002).

Sendo assim, entende-se que a busca por uma cafeicultura rentável e permanente passa pela valorização das fontes de nutrientes disponíveis regionalmente, o que fornece mais autonomia para o setor rural no tocante a sua adubação. Para tanto, são ferramentas

essenciais o uso de práticas e conhecimentos calcados na otimização dos recursos disponíveis na própria unidade de produção agrícola e na região, na participação dos agricultores e na valorização de seus saberes empíricos (CANELLAS *et al.*, 2005). Isto é, a possibilidade de se mobilizarem recursos locais e regionais adequados para condições tropicais e para solos com baixa capacidade de retenção de cátions é uma premissa para construção de um novo modelo de desenvolvimento rural (FEIDEN, 2001). Em contrapartida, utilizar maciçamente uma energia fóssil fornecida gratuitamente pela natureza desvaloriza o trabalho humano e autoriza uma predação ilimitada das riquezas naturais. Disso resulta uma superabundância artificial desenfreada, que destrói qualquer capacidade de maravilhamento das capacidades artesanais da habilidade humana (LATOUCHE, 2018).

Diante das ideias apresentadas, foi proposta a presente pesquisa, entendendo que produzir seu próprio adubo a partir de matérias primas regionais com a compostagem conjunta de resíduos orgânicos e rochas moídas pode ser uma tecnologia intermediária. Tecnologia esta dotada de fisionomia humana e capaz de fornecer as condições necessárias para se produzir café com maior autonomia e menor dependência de insumos externos, ao mesmo tempo desenvolvendo a propriedade rural como um organismo agrícola, com integração, diversidade e autossuficiência (MANGIÉRI-JUNIOR, 2002).

Nesse sentido, este trabalho está dividido em partes: revisão bibliográfica, avaliação da qualidade de um composto produzido com fontes regionais de nutrientes, análise de compostos produzidos com diferentes teores de pós de rochas, comparação das características de três compostos produzidos com três pós de rochas diferentes e, finalmente, avaliação do comportamento dos solos, da produtividade de café e da qualidade de bebida sob sistema de adubação convencional e orgânica no Noroeste do estado de Minas Gerais.

Concorda-se, portanto, que a ciência viva só será fecundada pela sabedoria do agricultor. Apesar da cientificidade, deve-se reinar tanto do elemento agrícola quanto possível, para iluminar a mais conservadora cabeça de um agricultor (STEINER, 2017).

## 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1- AGRICULTURA INDUSTRIAL

Ao longo de milhares de anos, diferentes povos realizaram uma agricultura baseada no manejo dos materiais disponíveis nas propriedades rurais (ESPÍNDOLA *et al.*, 1997). Buscava-se otimizar o uso dos recursos locais na condução dos agroecossistemas, no manejo do solo e na condução da produção através dos métodos biológico-vegetativos, sem o uso de agroquímicos, que até então eram desconhecidos dos agricultores (COSTA, 2017).

Em vários pontos do planeta e em várias épocas se acumularam conhecimentos sobre formas mais sustentáveis de existência, acreditando que se os povos estiverem concentrados em cuidar de sua terra, esta poderá sustentá-los. No entanto, é fato que o descuido com a saúde básica do solo acelerou a queda de várias civilizações. A história nos diz que civilizações foram florescendo apoiadas sobre determinada base natural e, à medida que cresciam, iam esgotando essa mesma base natural de que dependiam, gerando o conseqüente declínio de seu povo (MONTGOMERY, 2021). Portanto, o problema ecológico não é novo. No entanto, atualmente, há duas diferenças importantes: a Terra está muito mais densamente povoada e o ritmo das mudanças acelerou imensamente (SCHUMACHER, 1983).

O processo de inovação tecnológica na agricultura até a Segunda Revolução Agrícola, entre os séculos XVIII e XIX, caracterizou-se por tecnologias como rotação de culturas e integração entre atividades de produção vegetal e animal, que respeitavam o meio ambiente ao procurarem superar as limitações ecológicas à atividade agrícola, a partir da utilização inteligente das próprias leis da natureza, visando diminuir as restrições ambientais e a necessidade de trabalho (ASSIS; ROMEIRO, 2002). Certamente os primeiros agricultores já dispunham de um conhecimento bastante amplo sobre os vegetais. Evidentemente, este era inicialmente muito diverso daquilo que atualmente chamamos de conhecimento, mas já pressupunha algum entendimento sobre os fatores ambientais como solo, clima e estações do ano e de outros ligados a práticas agrícolas, como o papel das sementes na reprodução vegetal, o momento do plantio e da colheita e outras operações técnicas de manipulação (ALMEIDA JÚNIOR, 1995). Entretanto, com a disseminação dos conhecimentos da química agrícola, a partir do século XIX, esse

processo teve sua lógica modificada, passando-se a considerar, de maneira geral, que não era necessário seguir as regras ecológicas (ROMEIRO, 1998).

O livro “A química em sua aplicação na agricultura e fisiologia” (*Die Chemie in Ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*), de Justus von Liebig, de 1840, provocou uma mudança radical na forma de se nutrir as plantas, fornecendo as leis básicas da agronomia industrial. Nele foi formulada a teoria mineral de nutrição das plantas, que defendia que as plantas poderiam crescer sem compostos orgânicos, já que outras substâncias com os mesmos elementos essenciais poderiam substituir os excrementos dos animais. O sucesso comercial da ciência de Liebig é inegável, sendo muito bem aproveitada pelo Estado e pela economia a partir do início do século XX, uma vez que suas fábricas de fertilizantes tinham as mesmas matérias-primas e processos industriais para a fabricação de explosivos militares. A grande transformação que Liebig provocou foi a mudança total do paradigma da agricultura, já que até então ela era ligada intimamente com a pecuária e a criação de animais (PINHEIRO *et al.*, 1985; PINHEIRO, 2018).

Assim, enquanto anteriormente o pousio e o uso de esterco eram as práticas conhecidas para a recuperação das terras, a descoberta dos adubos químicos em meados do século XIX provocou uma grande mudança na forma de se fazer agricultura. Num terreno cansado, uns poucos quilos de adubos químicos podiam fazer aquilo que o pousio levaria anos para conseguir ou que exigiria toneladas de esterco e de esforço humano (KHATOUNIAN, 2001). Isso viabilizava a monocultura, com a eliminação da necessidade do cultivo de plantas forrageiras para a alimentação animal, cujo esterco era empregado na recuperação da fertilidade dos solos (ASSIS; ROMEIRO, 2002). Com o tempo, a ampla adoção de fertilizantes químicos fez com que as práticas agrícolas se distanciassem do cuidado e da reciclagem de nutrientes para simplesmente aplicá-los na forma de fertilizantes (MONTGOMERY, 2021).

Com isso, já no final do século XIX, na Europa, a agricultura foi transformada por descobertas científicas, quando a humanidade se desenvolveu sob uma lógica econômica que considerou os recursos naturais inesgotáveis e a degradação ambiental como um preço a ser pago pelo progresso tecnológico (ASSIS; ROMEIRO, 2002), que abriram caminho para o uso de adubos sintéticos. Este termo foi utilizado até os anos 1930, quando a palavra indicada passou a ser “adubo mineral” (KOEPP *et al.*, 1983). Os fertilizantes solúveis de síntese química (FSSQ) caracterizam-se essencialmente por sua alta solubilidade e altas concentrações, mas pequena diversidade de nutrientes, efeito residual

breve ou ausente, custos elevados, necessidade de importação e efeito de salinização e acidificação no solo.

A partir da extrapolação das descoerhas científicas de Liebig, foram difundidos amplamente sistemas agrícolas em que a prática principal era a adubação mineral a partir de compostos solúveis como base da produção vegetal, passando-se a considerar o solo apenas como substrato para sustentação das plantas e meio para veiculação desses compostos (ASSIS; ROMEIRO, 2002).

Os aumentos de produtividade decorrentes da utilização de tais produtos provocaram o abandono das práticas de adubação com fontes locais ou regionais de nutrientes, aderindo a um modelo de agricultura cada vez mais dependente de insumos externos às propriedades. Com a utilização corrente de adubos químicos e inseticidas, os sistemas agrícolas puderam simplificar-se significativamente em comparação com os sistemas antigos, cuja manutenção da fertilidade e sanidade dependiam de rotações e/ou de trabalhosos sistemas de adubação orgânica, estimulando a monocultura das culturas mais lucrativas e a redução da diversidade cultural. Convencionou-se chamar o avanço das indústrias química, mecânica e do melhoramento genético na área agrícola como Revolução Verde (JESUS, 1985).

Com o fim da II Guerra Mundial, quando o complexo petroquímico e mecânico ficou ocioso, a estrutura existente passa a ser utilizada para produção de insumos agrícolas para exportação para mercados agrícolas emergentes, como os dos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. A disseminação dessas práticas agrícolas no Brasil foi estimulada, a partir dos anos 1950, por grupos econômicos e pelos governos estadunidenses e brasileiro, com interesses diretos no consumo do petróleo, insumos químicos e mecânicos. Tal estratégia contemplou um maior intercâmbio entre as universidades dos Estados Unidos da América (EUA) e instituições de pesquisa nacionais, a reformulação das grades dos cursos de Agronomia, a adequação da estrutura laboratorial e do escopo das pesquisas científicas nacionais em curso nas universidades e instituições de pesquisa. Recursos financeiros substanciais foram aportados com tal finalidade pelos EUA, por meio de convênios específicos, gerando uma reorientação das pesquisas agrícolas nacionais (COSTA, 2017).

Desta forma, passaram a existir menos esforços de pesquisa direcionados a sistemas de produção complexos e menos consumidores de insumos. Com isso, a diferença de produtividade entre a agricultura menos produtiva e a agricultura mais produtiva do mundo aumentou muito (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Especificamente no Cerrado do Brasil, a transformação em espaço de produção exigiu a introdução de novas tecnologias, primeiramente em razão das limitações deste bioma (a irregularidade das chuvas e a baixa fertilidade dos solos) e, também, devido aos sistemas de produção locais na época pouco adaptados à produção em grande escala. Nesse sentido, o governo criou, por meio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), centros de pesquisa especializados que testaram neste bioma o modelo de agricultura moderna, composto pela mecanização agrícola, insumos químicos e sementes híbridas (FRANCO, 2001), sendo que tais tecnologias possibilitaram a produção em grande escala nesses solos profundos e quimicamente pobres (GOEDERT, 1989).

Desta forma, a produção de alimentos no Brasil, assim como em outros países tropicais, passou a estar relacionada ao uso dos fertilizantes solúveis de síntese química (FSSQ), ainda que estes possuam pouca diversidade de nutrientes (FYFE *et al.*, 2006), gerem produtos de pouco valor nutricional e apresentem desvantagens em seu comportamento relacionados ao clima tropical e às características intrínsecas ao solo situado nesse clima (LEONARDOS *et al.*, 2000). O nitrogênio na forma de ureia apresenta grandes perdas por volatilização (CANTARELLA, 2007). O potássio, na forma de cloreto de potássio, apresenta elevada mobilidade química e física por movimentação em solução e por lixiviação (BERTOL *et al.*, 2007; CHAVES, 1995). Por sua vez, os fosfatos solúveis são parcialmente retidos em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, abundantes em solos sob clima tropical (FERNANDES *et al.*, 2006; MEURER, 2012).

Embora o Brasil tenha atingido autossuficiência na maior parte dos produtos do segmento dos fertilizantes fosfatados entre 1980 e 1988, isso nunca ocorreu para os fertilizantes nitrogenados e potássicos (KULAIIF; FERNANDES, 2010). Tais insumos são em grande parte importados de poucos países (EUA, Rússia, Canadá e Marrocos), que são formadores de preços. Estes detêm as principais jazidas dos minerais utilizados para as formulações contendo os principais macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), considerados a base dos insumos utilizados para a produção agrícola moderna (THEODORO *et al.*, 2012).

Assim, o setor rural, que antes primava e se caracterizava pela autonomia e independência de energia externa, passa a ter uma crescente subordinação ao capital industrial com o uso desses sistemas de produção agrícola (PINHEIRO, 2018) e, exceto pelo clima, a dinâmica do campo está cada vez mais determinada pela indústria e por serviços ofertados e disponíveis nas cidades (BUIANAIN *et al.* 2020). Progressivamente,

os produtores rurais foram reduzidos a uma atividade de simples produção de matérias-primas agrícolas (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Um enfoque reducionista, centrado apenas nos processos químicos e mecânicos e nos aspectos econômicos e financeiros do setor rural, determina e justifica uma base tecnológica altamente dependente de energia fóssil, de baixa eficiência energética, disseminada de forma indiscriminada para as mais distintas realidades ecológicas (COSTA, 2017). Muitas vezes, por falta de adaptação ecológica e econômica dos elementos tecnológicos desse tipo de agricultura, os ganhos em lucratividade não são perceptíveis em função dos altos custos. Ehlers (1996) aponta que houveram aumentos inequívocos na produção de alimentos entre 1950 e 1984, mas que desde 1985 notou-se um declínio na produtividade agrícola mundial. Montgomery (2021) relata que a produtividade agrícola está se aproximando dos limites biológicos e está cada vez mais difícil até manter estáveis os rendimentos das culturas.

Portanto, a agricultura industrial está ligada primeiramente à domesticação das espécies e das paisagens. Isso gera a domesticação das grandes empresas sobre as práticas agrícolas, na qual a dependência completa dos agricultores é o elemento central, envolvendo principalmente grandes máquinas, sementes, agrotóxicos e FSSQ (CLEMENT, 1999).

Contudo, deve-se dar ênfase na adoção da tecnologia intermediária em vez das tecnologias capital-intensivas, na qual seja privilegiado o uso de mais mão de obra e seja potencializado o uso dos recursos locais. Tal tecnologia está ao alcance de muitos, não só em termo financeiros, mas também em termos de educação, aptidões e capacidade organizacional. Um caminho mais compatível com a realidade do nosso país, lançando-se mão de equipamentos mais simples, compreensíveis e adequados à manutenção e reparos no local (COSTA, 2017). Essa tecnologia, democrática e dotada de fisionomia humana, é planejada para servir ao ser humano, em vez de torna-lo escravo da máquina, reitegrando o homem, com suas mãos hábeis e cérebro criador no processo produtivo (SCHUMACHER, 1983).

Apesar do otimismo diante das teorias de Liebig, predominante na comunidade agrônoma no início do século XX, que permitiu uma rápida difusão do uso da adubação química na agricultura, práticas alternativas à agricultura moderna têm sido desenvolvidas desde a década de 1920 (EHLERS, 1994). Entretanto, foi a partir da década de 1960 que essas iniciativas passaram a ter um âmbito mundial (ASSIS *et al.*, 1996), ainda que acusadas de retrógradas e românticas (ASSIS; ROMEIRO, 2002). Khatounian

(2001) aponta que, para os organismos internacionais, especialmente a Organização das Nações Unidas, a postura predominante até o início dos anos 1970 era a de que toda a contestação ao modelo convencional era improcedente. Contudo, o acúmulo de evidências em contrário foi obrigando a uma mudança na postura oficial, o que não significava, em si, uma total ruptura em relação ao modelo vigente, tão influenciado pelas grandes corporações com forte poder econômico e influência política.

Por mais que a agricultura industrial tenha avançado em técnicas que procurem ultrapassar os limites estabelecidos pela natureza, a prática agrícola continua a ser uma atividade essencialmente dependente do meio ambiente. Observam-se sistemas de produção alternativos empregados em diferentes condições ambientais, apresentando resultados satisfatórios do ponto de vista ecológico, agrônômico, econômico e social (ASSIS; ROMEIRO, 2002).

Diante de tanta complexidade e efeitos colaterais, produzir seu próprio adubo com fontes regionais de nutrientes demonstra a evolução, consciência e sucesso da resistência e empoderamento dos agricultores e da agricultura na construção de uma nova realidade, superando as vontades do mercado e da ciência submissa (PINHEIRO, 2018). Essa é uma necessidade como componente do caminho para se devolver a autonomia ao produtor rural e combater parte dos problemas ecológicos, sociais, agrônômicos e econômicos causados pela agricultura industrial.

## 2.2 - FONTES REGIONAIS DE NUTRIENTES

O caminho técnico e químico da agricultura industrial passou por um desenvolvimento extraordinário com a ajuda de enorme aparato tanto da ciência quanto da indústria química e tecnológica. Entretanto, tal caminho foi pavimentado por muitas correções e por leis restritivas, já que, constantemente, foram sendo produzidos novos problemas. Ademais, é evidente que, baseados em recursos finitos, nutrientes essenciais em algum momento não estarão disponíveis para a agricultura convencional. Portanto, é necessário desenvolver e incrementar métodos que possam aproveitar ao máximo as oportunidades locais com o mínimo de insumos externos (WISTINGHAUSEN *et al.*, 2000). O desrespeito à regionalidade é um dos problemas que a humanidade tem que enfrentar no que se refere à agricultura e alimentação. Ao mesmo tempo, a agricultura orgânica, prática ancestral, “evoluiu” para um estranho sistema em que se compra materiais caros e de longe em vez de se usar o que é barato e está perto (CHO, 2018).

A regionalização significa menos transporte, cadeias de produção transparentes, uma dependência reduzida dos fluxos de capitais das multinacionais e maior segurança em todos os sentidos do termo. Regionalizar e reinserir a economia na sociedade local preserva o meio ambiente (que, em última instância, é a base de toda economia), reduz o desemprego, fortalece a participação e, portanto, a integração (LATOUCHE, 2018). Isso contribui para a resolução de problemas de forma ambientalmente mais adequada e cria vínculos sociais e econômicos mais robustos. A essa lógica se contrapõe a verticalização da produção convencional, que vincula o agricultor exclusivamente à indústria à qual está integrado, que, por sua vez, trabalha com mercados distantes, fora de qualquer controle do agricultor. Nessa situação, vão se debilitando os laços econômicos do agricultor com seu meio geográfico, terminando por isolá-lo do contexto social em que ele vive (KHATOUNIAN, 2001).

Entende-se como fontes regionais de nutrientes (FRN) os resíduos orgânicos e os pós de rochas que se situam dentro do país, com menor grau de padronização e feitos em escalas de produção reduzidas em comparação às *commodities*. Estas são produtos que têm elevado grau de padronização, fabricados e comercializados em grandes quantidades em processos produtivos, geralmente, contínuos (GOMES-CASSERES; McQUADE, 1991). Ao contrário das *commodities*, que podem ser transportadas entre continentes, as FRN possuem limitações logísticas.

As FRN apresentam vantagens em relação às fontes convencionais de nutrientes, tais como a ocorrência bem distribuída em território nacional, o baixo custo de produção, a simplicidade do processo produtivo, a diversidade de nutrientes, o efeito residual, a complexidade composicional e o efeito condicionador. Isso porque os fertilizantes solúveis de síntese química (FSSQ) são, em geral, importados, utilizam combustíveis fósseis para sua produção, possuem poucas variedades de nutrientes e, aliados à sua alta solubilidade, apresentam riscos potenciais de contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

### 2.2.1 - Rochagem e Remineralizadores

As rochas, além de guardiãs da história de formação do planeta e filhas do ventre da terra, são as mães do solo. Hensel (1898) dizia que as rochas em pó são o leite materno da rocha mãe. Por isso, a maior parte dos elementos primordiais às plantas está presente na litosfera, fazendo parte da constituição das rochas e dos minerais. Para que se tornem disponíveis para as plantas, as rochas passam por processos de intemperismo, que ocorre naturalmente de forma lenta (MELO *et al.*, 2012).

Os pioneiros Missoux (1853) e Hensel (1898) já indicavam as rochas moídas como poderosos ativos escaláveis que compõem um conjunto de soluções regionais essenciais para o manejo sustentável da fertilidade do solo agrícola. Hensel (1898) apontava que, para termos cultivos saudáveis e alimentos que sustentem nossos corpos, seria necessário repor mais do que o NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) nos solos e que, para tanto, não seria necessário esperar milhares de anos até que o frio do inverno, a neve e a chuva desintegrassem o material rochoso e o trouxesse para os vales, mas que seria fundamental obter pós de rochas silicáticas adequados para rejuvenescer o velho e desgastado solo e conduzi-lo novamente ao estado virginal de sua fertilidade.

*Rochagem* é a denominação dada à tecnologia que parte do pressuposto de que determinados tipos de rochas, em pó, podem fornecer de forma adequada a quantidade de nutrientes para os solos e, na sequência, para as plantas, utilizada para aumentar a fertilidade e disponibilidade de minerais nos solos pobres e lixiviados. Esse processo já é mais afamado com rochas carbonáticas (calcário agrícola), fosfáticas (fosfatos naturais) e sulfáticas (gipsita). O uso de rochas silicáticas no processo de rochagem de forma regulamentada é mais recente, sendo designado também como *remineralização de solos*.

Os silicatos, minerais formadores das rochas, são os mais abundantes na crosta terrestre (PRESS, *et al.*, 2006). As rochas silicáticas possuem mais de 50% de silicatos

em sua constituição e normalmente contêm nutrientes de plantas em quantidades e disponibilidades que variam em função dos minerais presentes nas rochas. Por essa razão, essas rochas têm sido objeto de estudos visando avaliar seus potenciais como fontes alternativas para o suprimento nutricional às plantas (RIBEIRO *et al.*, 2010). A aplicação desses remineralizadores aos solos adiciona uma vasta quantidade de minerais e nutrientes que foram perdidos ao longo dos processos intempéricos ou antrópicos (VAN STRAATEN, 2007).

No Brasil, os primeiros trabalhos sobre o uso de remineralizadores e sua influência nos cultivos foram realizados nas décadas de 1950 (ILCHENKO; GUIMARÃES, 1953), 1960 (LIMA *et al.*, 1969), 1970 (LEONARDOS *et al.*, 1976) e 1980 (LEONARDOS *et al.*, 1987). Esses trabalhos sugeriam o uso de pó de rocha para aumentar a fertilidade dos solos lateríticos do país. Contudo, tais sugestões não encontravam eco, porque os preços dos fertilizantes e seu acesso eram facilitados por políticas públicas, implementadas com a finalidade de fortalecer o modelo da Revolução Verde. No final dos anos de 1990 e início do século XXI, o tema ganhou força devido à ascensão dos preços dos fertilizantes e ao aumento dos problemas ambientais gerados pelo uso intensivo de fertilizantes solúveis (THEODORO *et al.*, 2021).

A partir do final da década de 1990 e início dos anos 2000 foram apresentadas pesquisas sistemáticas desenvolvidas pela Universidade de Brasília (THEODORO, 2000) e pela Embrapa Cerrados (RESENDE *et al.*, 2006). A primeira proposta de desenvolvimento de critérios para regulamentação foi realizada por Martins (2013). Hoje, esses agrominerais silicáticos são enquadrados como remineralizadores de solos, com efeitos no fornecimento de nutrientes para as plantas e na melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas do solo, pela Lei nº 12.890 (BRASIL, 2013) que alterou a Lei dos Fertilizantes (Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980). Nem toda rocha moída é um remineralizador, pois para ser registrado no Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) o agromineral silicático precisa ter avaliado os seguintes critérios, conforme Instrução Normativa 5/2016 (MAPA, 2016):

1. soma de bases – mínimo 9%;
2.  $K_2O$  – mínimo 1%;
3. quartzo – máximo 25%;
4. limites máximos de elementos potencialmente tóxicos em ppm (As <15, Cd<10, Hg <0,1, Pb <200);
5. granulometria – farelado, pó ou filler;

6. pH de abrasão;

7. protocolo agronômico (avaliação da eficiência agronômica).

Brady e Weil (2010) definiram o solo como um conjunto de corpos naturais composto de uma mistura variável de minerais despedaçados e desintegrados e de matéria orgânica em decomposição, que cobre a terra com uma camada fina e que fornece, desde que contenha as quantidades necessárias de ar e de água, amparo mecânico e subsistência para os vegetais. No intemperismo, os minerais primários se decompõem para produzir os minerais secundários e, nesse processo, muitos elementos nutricionais são disponibilizados para a biosfera. Uma fração é absorvida pelas plantas e o restante, embora possa ser armazenado por um tempo nas superfícies de minerais argilosos, acaba sendo perdido por lixiviação. Isso significa que há uma perda natural e constante da fertilidade do solo ao longo do tempo. Sob clima tropical, o solo se torna ácido e relativamente pouco fértil com o passar do tempo (CHERSWORTH *et al.*, 1989). Nos Latossolos dos trópicos, por causa da rápida decomposição dos silicatos primários, perderam-se a maioria dos nutrientes vegetais e o que se resta são óxidos de ferro e de alumínio, e quartzo (SCHELLER, 2000).

Nesse sentido, o uso de remineralizadores para melhorar a fertilidade dos solos reproduz um mecanismo que a natureza utiliza ao longo do processo de intemperismo das rochas, sendo assim a produção baseada em ciclos naturais (THEODORO, 2020). Assim, simula-se e acelera-se um processo de rejuvenescimento dos solos que acontece naturalmente por meio de erupções vulcânicas, movimentos glaciares e depósitos aluviais. Nessa lógica, Gil (2017) e Pratt *et al.* (2020) apontam a importância do uso de rochas moídas para se alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, ainda mais considerando que estamos em uma era geológica na qual o processo de erosão dos solos é mais forte que seu processo de formação, como apontam alguns estudos (COUTO-JÚNIOR *et al.*, 2016; SARDINHA *et al.*, 2018; FERNANDES *et al.*, 2019; SARDINHA *et al.*, 2019). Portanto, fertilizar a terra com a própria terra significa rejuvenescê-la com rochas, renovando os solos intemperizados que já sofreram lixiviação em função do tempo (THEODORO, 2000), distinguindo-se dos adubos químicos sintéticos essencialmente pelo grau de solubilidade, pela composição multilateral e pela lenta atuação fisiológica (KOEPP *et al.*, 1983).

Outrossim, com o aprimoramento da tecnologia da rochagem, pode-se fomentar e fortalecer iniciativas adequadas às realidades dos países tropicais que possuem vocação agrícola e disponibilidade de recursos naturais bastante diferenciadas dos países

desenvolvidos, diminuindo também a dependência externa (THEODORO *et al.*, 2012; THEODORO; LEONARDOS, 2015). A autossuficiência de fertilizantes é um pré-requisito necessário para a segurança alimentar de uma nação que, no mundo em desenvolvimento, depende em grande parte da independência em matérias-primas para fertilizantes, o que muitas vezes pode ser obtido em escala local (CHESWORTH *et al.*, 1989). Walan *et al.* (2014), por exemplo, apontam os problemas futuros com a possibilidade de o mundo depender completamente do fosfato do Marrocos. Nos países tropicais, com grande geodiversidade e importância no setor agrícola para a geração de alimentos e renda, o uso de pós de rocha é uma importante opção produtiva, especialmente porque esses países são grandes importadores de insumos químicos (RAMOS *et al.*, 2021).

Estudos iniciais mostram que, no Brasil, as zonas com maior potencial de produção de remineralizadores geralmente ocupam ambientes distintos das zonas consumidoras. Todavia, as análises preliminares de algumas regiões agrícolas indicam que a necessidade de agrominerais silicáticos para o manejo da fertilidade do solo agrícola pode ser suprida regionalmente, com aumento da eficiência de uso de nutrientes nos sistemas produtivos (MARTINS *et al.*, 2010). No Brasil, a maioria das áreas agrícolas fica em distância menor que 300 km de uma área produtora de remineralizadores - uma distância normalmente considerada como limite para considerar o local apto para uso (BRASIL, 2020), mas que pode ser aumentada de acordo com variação no preço dos FSSQ e com o teor de potássio disponível no produto.

Quando se pensa na imensa geodiversidade brasileira, nota-se que vários tipos de rochas se prestam ao uso como remineralizadores de solos. Dentre esses materiais geológicos, destacam-se as rochas ultramáficas, ricas em magnésio, as calcissilicáticas, ricas em cálcio, os basaltos, ricos em cálcio e magnésio, as alcalinas, ricas em potássio, e as ultramáficas alcalinas, ricas em cálcio, magnésio e potássio. Essas rochas são normalmente compostas por minerais primários, tais como olivinas, piroxênios, anfibólios, feldspatos, micas e apatitas, que são quimicamente formados por compostos de potássio, fósforo, cálcio, magnésio e uma ampla gama de micronutrientes (THEODORO; LEONARDOS, 2011). As doses aplicadas ao solo como remineralizador, entretanto, devem considerar a riqueza existente na rocha dos nutrientes que se quer fornecer, sua mineralogia, o grau de deficiência do solo, a demanda da planta a ser cultivada (MELO *et al.*, 2012; VAN STRAATEN, 2006), as características da planta e do solo, além da granulometria da rocha moída (WINIWATER; BLUM, 2008), sendo

ideal pelo menos 80% passante na peneira de 0,3 mm. Além disso, a eficiência agronômica do pó de rocha também dependem das condições de clima e da atividade microbiana do solo (SWOBODA *et al.*, 2022).

Por exemplo, Marchi *et al.* (2020) notaram em sua pesquisa que a solubilidade e a disponibilidade de Cu, Ni e Zn dependem da solubilidade dos minerais que compõem os agrominerais. Priyono e Gilkes (2004) concluíram que uma menor granulometria pode aumentar substancialmente a disponibilidade dos elementos alcalinos dos agrominerais para plantas, sendo o basalto e dolerito moídos finos eficazes fornecedores de Ca e Mg, enquanto o feldspato pode ser usado como fonte de K. Wang *et al.* (2000) observaram que quanto menor a partícula do gnaiss maior a liberação de potássio para as plantas.

Já Zhao *et al.* (2019) concluíram que os produtos minerais de silicato de potássio podem substituir parcialmente os FSSQ de K em rotação de arroz e trigo. Eles destacam também o aumento do pH em relação as áreas em que foi usado o KCl. Resende *et al.* (2006) avaliaram a capacidade de fornecer potássio de três rochas moídas: biotita xisto, brecha alcalina e ultramáfica alcalina. Os resultados indicaram que há pronta liberação de parte do potássio, suficiente para atender a demanda das plantas de milho. No mesmo sentido, Rodrigues *et al.* (2021a) aplicaram pós de rochas oriundas das Formações Irati e Corumbataí e concluíram que elas podem ser usadas como fontes alternativas e limpas de K, Mg e S para a cana de açúcar.

Além de produtividades compatíveis, os experimentos com a tecnologia da rochagem sustentam que as culturas de ciclo longo apresentam melhor desempenho do que aqueles obtidos com a adubação convencional, que há potencial para o teor de umidade ser maior em solos onde se adicionam remineralizadores de solos devido à retenção de água pelas argilas, que as plantas mostram maior quantidade de massa verde e melhor perfilhamento, que as raízes apresentam-se em maior quantidade e são mais desenvolvidas do que as plantas que recebem a adubação convencional, que os custos são menores quando comparado com a adubação química e que seu efeito pode se estender por até quatro ou cinco anos seguidos devido ao efeito da liberação lenta dos nutrientes de acordo com a demanda da planta (MELAMED *et al.*, 2009; THEODORO; LEONARDOS, 2011). Acrescenta-se ainda a ampliação do sequestro de carbono (BEERLING *et al.*, 2018; BEERLING *et al.*, 2020; LEFEBVRE *et al.*, 2019; PRATT *et al.*, 2020), o maior aproveitamento do fósforo existente no solo devido as interações silício-fósforo (CARVALHO *et al.*, 2001), o aumento da capacidade de troca de cátions pela formação de argilominerais 2:1, a contribuição para resiliência do sistema produtivo

(KRAHL *et al.*, 2020; MARTINS *et al.*, 2010; TARUMOTO, 2019) e a melhoria na qualidade nutricional do alimento produzido (THEODORO; LEONARDOS, 2015).

Já na década de 1930, Howard (2007) relacionava a agilidade, resistência e temperamento alegre do povo Hunza com sua agricultura, que recebia aplicações anuais de pó de rocha produzido pelo degelo nas montanhas vizinhas, ainda que o autor ressalte a necessidade de mais pesquisas sobre o assunto. Cho (2018) aponta que, para os seres humanos, o número de minerais essenciais é maior que 70. O mesmo autor revela que uma maçã por dia já foi suficiente para manter uma pessoa saudável e, atualmente, devido a não reposição dos elementos lixiviados dos solos, precisamos de 32 maçãs. Burbano *et al.* (2022) confirmam a relação direta entre o conteúdo nutricional da cultura da quinoa e o uso de diferentes insumos, mostrando que as plantas produzidas a partir do uso de remineralizadores possuem maiores quantidades de K, Ca, Mn e B se comparadas às plantas adubadas com NPK.

Dalmora *et al.* (2020) demonstraram que a aplicação de andesito e dacito moídos podem substituir os FSSQ, devido às altas taxas de dissolução de seus minerais. O dacito foi mais eficaz para o potássio, enquanto, o andesito, para o cálcio. Dias *et al.* (2018) constataram que a adubação potássica para o cafeeiro com rocha baseada no mineral silicatado glauconita aumentou a fertilidade do solo, com correção da acidez e com elevação dos teores de K, P, Ca, CTC efetiva e dos níveis de Zn e Fe no solo. Ademais, a adubação com 336 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O derivado desse agromineral, em dose única, proporcionou produção de grãos semelhantes às da fertilização com 618 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O de KCl, de forma parcelada, e melhor análise sensorial da bebida.

Os minerais primários constituintes das rochas, a exemplo da biotita, sofrem as transformações naturais em seus processos intempéricos, formando minerais secundários 2:1, como a vermiculita, promovendo desta forma um ganho de capacidade de troca catiônica (CTC) nos solos tratados com estes materiais (SILVA *et al.*, 2017; TOSCANI; CAMPOS, 2017). O aumento dos teores de P no solo pode estar vinculado diretamente à presença deste nutriente no remineralizador, na forma de apatitas em alguns materiais que, mesmo sendo baixos, contribuem para estes pequenos incrementos (LUCHESE *et al.*, 2021) ou por dois outros efeitos indiretos que ocorrem com a aplicação de remineralizadores, sendo eles o aumento do pH e a entrada de óxido de silício no sistema, que pode competir com os sítios de adsorção do fosfato (ALLEONI *et al.*, 2019, CORNELL; SCHWERTMANN, 2001; MATICHENKOV; BOCHARNIKOVA, 1996).

Rudmin *et al.* (2019) encontraram benefícios com o uso de silito glauconítico no solo, aumentando significativamente o rendimento dos grãos de trigo. Seu uso aumentou as concentrações de carbono orgânico, nitratos, amônio trocável, K, P, Ca e Mg e o pH do solo passou de 6,0 para 6,7. Enquanto o efeito do calcário é devido à reação dos carbonatos de cálcio e magnésio que o constituem, o remineralizador promove o aumento do pH pelo consumo de  $H^+$  na reação de intemperismo dos silicatos. É esperado um efeito mais rápido quando ocorrem maiores quantidades de silicatos de Ca, sendo seguidos pelos silicatos de Mg, Na e K (ANDA *et al.*, 2015).

De forma semelhante, Priyono *et al.* (2009), em estudo com rochas silicatadas originadas de vulcões na Indonésia, concluíram que o uso desses agrominerais aumentou a quantidade de nutrientes vegetais extraíveis e a atividade dos microrganismos do solo, além de corrigir a acidez. Martinazzo *et al.* (2020) observaram, em estudo com banco de dados de rochas que abrangem grande parte do Brasil, que a maior parte das rochas não apresenta concentrações problemáticas de metais pesados e que, além de Ca, Mg e K, os remineralizadores podem fornecer micronutrientes a longo prazo. Almeida *et al.* (2018) encontraram resultados de aumento de disponibilidade de fósforo em mudas de café com a aplicação do remineralizador oriundo de silito glauconítico.

Outrossim, Rodrigues *et al.* (2021b) avaliaram, em estufa, o uso de coprodutos da mineração de calcário da Formação Irati e encontraram como benefício o aumento do pH do solo, do conteúdo de potássio e de fósforo disponível e a elevação na produção em massa seca dos brotos de milho. A biotita sienito moída foi capaz de aumentar o P, K, a absorção de N e K pelo milho e as cargas permanentes do solo, auxiliando no crescimento das plantas (RODRIGUES *et al.* 2021b).

Portanto, os remineralizadores caracterizam-se essencialmente pela baixa solubilidade, baixas concentrações, ampla oferta de nutrientes, efeito residual prolongado, custos reduzidos, produção regional, neoformação mineral, captura e armazenamento de  $CO_2$  e fortalecimento do sistema solo-planta-microrganismos (THEODORO *et al.*, 2012), já que os adubos menos solúveis desequilibram menos os outros nutrientes do solo e possibilitam menor indução de doenças e pragas (PRIMAVESI, 2021) e dificilmente são superdosados (KOEPP *et al.*, 1983). No entanto, mesmo considerando a possibilidade de se mobilizarem recursos locais e regionais, adequados para condições tropicais e para solos com baixa capacidade de retenção de cátions, 83% do total dos fertilizantes consumidos no país são derivados de fontes

importadas convencionais de nutrientes, compostas essencialmente de variantes de NPK (ANDA, 2022), de elevada concentração e alta solubilidade (RODRIGUES, 2009).

O principal questionamento sobre a eficiência do uso dos remineralizadores está relacionado a sua pouca solubilidade em água. Ainda que os remineralizadores possuam solubilidade mais lenta, se comparados aos insumos químicos, eles compensam essa “fragilidade” com uma oferta mais diversificada de nutrientes durante períodos mais longos (VAN STRAATEN, 2006; THEODORO *et al.*, 2021). Mesmo que essas fontes multinutrientes de liberação lenta (CARVALHO, 2013) sejam as mais adequadas para condições tropicais, capazes de fornecer os nutrientes de acordo com as necessidades de cada fase dos cultivos, reduzindo-se as perdas por lixiviação (JIMENEZ-GÓMEZ, 1992; MANNING; THEODORO, 2020), a afirmação sobre solubilidade deve ser contextualizada. A disponibilidade do material depende da composição química, dos minerais que o constituem e do tamanho das partículas adicionadas ao solo (HENSEL, 1898; FYFE *et al.*, 2006), além da intensidade biológica do sistema agrícola.

Por exemplo, os nutrientes contidos nos minerais de baixa cristalinidade, a andesina, labradorita, augita, anortita, anfibólio, piroxênio e olivina reagem já no primeiro ciclo na interação solo-água, enquanto, a biotita, clorita e apatita necessitam da interação solo-água-planta. Já a ilmenita, magnetita e ortoclásio reagem no segundo ciclo na interação solo-água-planta, ao passo que o quartzo não reage em um prazo de décadas (TARDY; DUPLAY, 1992; WIELAND *et al.*, 1988). O feldspato potássico e a muscovita podem ser considerados como reservas minerais a longo prazo, sendo o primeiro de liberação lenta (BADR, 2006) e, o segundo, de liberação muito lenta (SONG, 1988). Curi *et al.* (2005) apontam que a flogopita e a biotita liberam o potássio prontamente. Teixeira *et al.* (2008) citam a seguinte ordem crescente de estabilidade dos minerais: halita, calcita, olivina, anortita, piroxênios, anfibólios, albita, biotita, ortoclásio, muscovita, argilominerais, quartzo, gibsita e hematita.

A liberação também depende da forma química que o nutriente se encontra no remineralizador. Embora possam ocorrer em pequenas quantidades na forma de carbonatos, a presença de silicatos de cálcio como andesina, labradorita e augita são frequentes e, conseqüentemente, tendem a ser os principais responsáveis pelo cálcio liberado no solo. Dentro dos materiais silicatados, os silicatos de cálcio são caracterizados como mais reativos, já que o Ca apresenta ligações mais fracas com o Si em comparação ao Mg e K (KELLAND *et al.*, 2020, ANDA *et al.*, 2015). Já Swoboda *et al.* (2022) demonstram resultados positivos e negativos quanto à liberação de Ca, Mg e K presentes

nas rochas moídas. Lepsch (2011) aponta que, em geral, os minerais que possuem cálcio e magnésio em sua composição são menos estáveis. Kämpf *et al.* (2009) afirmam que as micas são os minerais com K mais comuns nos solos. Em seu processo de intemperismo, o  $K^+$  é liberado, transformando-as em vermiculita e esmectita. Entre as micas, a velocidade e intensidade de transformação e liberação de potássio é maior na biotita e menor na muscovita e ilita (MACKINTOSH; LEWIS, 1968). Por isso, essas estão mais presentes no solo e, aquela, nas rochas. A transformação de biotita em vermiculita pela ação de plantas atuando na absorção de K foi demonstrada por Mortland *et al.* (1956).

Kämpf *et al.* (2009) também mencionam que silicatos primários, com exceção da muscovita e quartzo, podem intemperizar rapidamente quando há elevada disponibilidade de água, como, por exemplo, no caso da apatita, olivina, anfibólios, piroxênios, biotita, glauconita, clorita, albita, plagioclásios e microclínio. Os argilominerais secundários intemperizam lentamente, enquanto a caulinita, gibsita e os óxidos são resistentes à intemperização, pois, normalmente, já são produtos do ambiente de intemperização.

Além disso, as plantas podem também usar nutrientes pouco solúveis presentes no solo, desde que haja vitalidade do organismo planta-solo (SCHELLER, 2000). Ainda que as rochas moídas possam ser pouco solúveis, elas podem ser biodisponíveis, uma vez que os nutrientes podem ser absorvidos por plantas e/ou microrganismos do solo. Assim, fertilizantes de proveniência geológica local devem ser usados em conjunto com medidas biológicas (CHESWORTH *et al.*, 1989; PINHEIRO, 2018; TAVARES, 2017). É essencial que sejam utilizadas práticas que mantenham e/ou aumentem vida no solo, pois na ausência de vida, toda a riqueza de minerais contida no solo seria inacessível aos vegetais (KOEPPF *et al.*, 1983). Com isso, seguiria-se a lógica de se adubar as plantas, e não a terra, com fertilizantes solúveis, o que contraria o processo evolutivo das plantas, em que as raízes absorvem de forma ativa os nutrientes (SCHELLER, 2000). A disponibilidade de microrganismos em determinados solos facilita o biointemperismo e a disponibilização de nutrientes minerais (THEODORO, 2000; VAN STRAATEN, 2006).

Krahl *et al.* (2022) demonstram que o processo de intemperismo da mica biotita, com a ação das raízes de milho, formam minerais novos desde os primeiros 45 dias, aumentando a CTC e liberando nutrientes, os quais são acumulados no tecido vegetal. O processo biológico dos sistemas agrícolas precisa ser intensivo para que ocorra o processo de biointemperismo em um prazo útil para a produção agrícola. O uso de remineralizadores em solos biologicamente pobres, compactados e sem cobertura de palha geralmente demorará mais para apresentar efeitos agrônômicos significativos. O

funcionamento biológico dos solos tratados com agrominerais silicáticos é uma variável dependente de sua eficiência. Dessa forma, não faz sentido avaliar a solubilidade em água desses produtos. É importante lembrar que o pH de abrasão é um mecanismo revelador do potencial de dissolução dos remineralizadores em água no curto prazo, conforme descrito por Portilho e Leonardo (1976). Ele indica a presença de silicatos compostos por bases e o efeito da moagem. Quanto mais fino for o produto, maior será o pH de abrasão até o limite máximo da hidrólise dos minerais (GRANT, 1969). Dias *et al.* (2013) mostraram que os remineralizadores apresentam solubilidade em água muito baixa e que apenas o processo de acidez do solo e o processo biológico do sistema produtivo associados às raízes das plantas permitem uma dissolução mais ampla dos remineralizadores e todos os seus efeitos benéficos.

A presença de ions  $H^+$  aumenta a protonação na superfície mineral e enfraquece as ligações de metal-oxigênio da estrutura do mineral. Os ácidos orgânicos presentes na matéria orgânica e/ou exsudados de microrganismos e plantas, podem facilitar a intemperização de minerais pela formação de complexos orgânico-metálicos ou pela liberação de  $H^+$  (HARLEY e GILKES, 2000), como apontado por diversos estudos (BADR, 2006; ETESAMI *et al.*, 2006; SONG; HUANG, 1988; XUE *et al.*, 2018). Outros trabalhos demonstram a importância da vida no solo para disponibilização dos nutrientes.

Hinsinger *et al.* (1993) demonstraram a capacidade das raízes de canola para promover a transformação e dissolução de uma mica na rizosfera. No mesmo sentido, Hinsinger *et al.* (2001) demonstraram que, em condições laboratoriais, diversas espécies vegetais provocaram aumento na liberação de Si, Ca, Mg e Na oriundo de pó de basalto, sendo entendido como um processo de curto prazo.

Já Manning (2018) indicou em seu estudo que o intemperismo de silicatos de potássio, mediados por comunidades microbianas do solo, ocorre de forma suficientemente rápida para fornecer nutrientes às plantas em crescimento. Martins *et al.* (2014) apontam que o biointemperismo promovido pela rizosfera da cultura é o processo central para disponibilidade dos agrominerais nos sistemas agrícolas. Semelhantemente, Wu *et al.* (2021) verificou que as atividades radiculares aceleram o intemperismo de minerais similares a biotita. Setiawat e Mutmainnah (2016) estudaram os microrganismos solubilizadores de potássio isolados da rizosfera da cana de açúcar e consideraram que eles são capazes de solubilizar o K a partir de uma fonte pouco solúvel do nutriente.

Ademais, procedimentos de beneficiamento físico, químico ou biológico podem ser realizados para aumentar a disponibilidade dos minerais. As moléculas orgânicas

produzidas por microrganismos, incluindo bactérias e fungos micorrízicos, são capazes de solubilizar os compostos minerais originando uma espécie de biofilme, que tende a criar um microambiente congênito que facilita a dissolução dos minerais formadores das rochas (ZHANG *et al.*, 2020).

Theodoro *et al.* (2020) concluíram em sua pesquisa que o uso de remineralizadores e compostos orgânicos mostrou-se uma tecnologia adequada e sustentável para mitigar os processos de degradação do solo. Neste sentido, em muitos casos, as rochas silicáticas moídas são misturadas a compostos orgânicos e a liberação dos nutrientes pode ser acelerada por meio de mecanismos físico-biológicos controlados (THEODORO, 2020). Petterssen Neto (2010) indica a aplicação de pós de rochas incorporados no composto.

Inserir rochas moídas no processo de compostagem é uma forma de beneficiamento biológico do produto e de estímulo da vida na parte orgânica da compostagem. Os microrganismos presentes no composto encontram matéria prima e aceleram, por meio dos ácidos húmicos, a quebra dos compostos químicos presentes, especialmente nos argilominerais e, ao mesmo tempo, o pó de rocha acelera a compostagem, por estimular a atividade biológica (PINHEIRO, 2021).

A adoção de rotas que incluem os remineralizadores configura-se como uma estratégia importante para assegurar e manter o papel de vanguarda da agricultura brasileira, com a vantagem de garantir mais autonomia para o setor e para o país no que se refere ao abastecimento interno de insumos, ampliar a qualidade nutricional das culturas agrícolas e ser um produto mais resiliente para os solos situados em clima tropical. Seu funcionamento, todavia, parte do pressuposto do biointemperismo das rochas, sendo essencial, portanto, estratégias que mantenham o agroecossistema vivo.

### 2.2.2 - Compostagem

Para bem compreender a ação dos adubos utilizados em agricultura ecológica sobre o solo e as plantas, pode-se comparar os efeitos químicos aos biológicos e físicos, ou os efeitos imediatos e pouco duradouros aos efeitos mais lentos e duradouros. A palhada de cereais tem efeito quase exclusivamente biológico, ligado à alimentação das cadeias tróficas associadas à decomposição da biomassa. É um material sobretudo celulósico. No extremo oposto, o esterco líquido de suínos, composto essencialmente por materiais do conteúdo celular, apresenta efeito sobretudo químico. A linha divisória entre o efeito químico e o biológico é arbitrária, mas pode-se dividir os adubos orgânicos em três classes: celulósicos ou de efeito mais lento e mais duradouro (palhada de cereais e esterco de ruminantes); de conteúdo celular ou de efeito mais rápido e fugaz (palhada de leguminosas, esterco de aves e suínos); e intermediários, como o composto (KHATOUNIAN, 2001).

A técnica da compostagem reflete a ideia de se entender a agricultura de forma cíclica. Nesse sentido, compreende-se o ciclo de que a terra alimenta as plantas, as plantas alimentam os animais, os animais estrumam a terra, a terra alimenta as plantas e assim por diante (SEYMOUR, 2011), entendendo a propriedade rural como um sistema biológico conduzido pelo homem, com limites, componentes e interações entre seus componentes, e troca de matéria e energia com o meio externo (KHATOUNIAN, 2001).

Em contrapartida, a natureza é resistente à aplicação prática de teorias que contradizem suas leis. Em nome de uma superioridade econômica da agricultura industrial, a tentativa de substituição da natureza cíclica e complexa dos processos ecológicos na agricultura por fluxos lineares de matéria e energia tem gerado custos ambientais e sociais devastadores para as sociedades contemporâneas (PETERSEN *et al.*, 2017). Mesmo Justus von Liebig, conhecido como o pai da química agrícola (MAAR, 2006), alertava que a industrialização havia criado uma nova divisão do trabalho entre a cidade e o campo, de modo que os alimentos consumidos pela classe trabalhadora nas grandes cidades não geravam mais subprodutos para reposição de adubo no solo, esgotando, gradativamente, seu estoque de nutrientes (FOSTER; CLARK, 2018).

Até mesmo a total separação entre agricultura e pecuária é causa de um problema semelhante. Desde o período neolítico, operou-se uma primeira grande diferenciação geográfica entre sociedades de cultivadores e sociedades de criadores. Isso, entretanto, não significou uma separação absoluta entre culturas e criação. Ao contrário: raros foram

os sistemas de cultivo que não comportavam algumas criações e raras foram as sociedades pastoris que não praticavam alguns cultivos. Diversos povos misturavam dejetos com uma base composta de folhas ou palhas de cereais, produzindo um tipo de composto facilmente manipulável com o gadanho e também transportável, já que as vantagens do uso do esterco produzido pelos animais em estábulo são conhecidas desde a antiguidade (MAZOYER; ROUDART, 2010). Seu uso pode ser atualmente entendido, então, como uma concepção moderna de uma prática ancestral, pois, desde suas origens, o sucesso das atividades agrícolas esteve associado à utilização de materiais orgânicos como fertilizantes, sendo essencial a presença de animais em qualquer propriedade agrícola.

Ao se realizar a compostagem, o ser humano assume o papel de acelerador dos processos naturais, fornecendo condições físicas e químicas ideais aos microrganismos responsáveis pela transformação das matérias primas orgânicas. Neste contexto, percebe-se o homem como agente transformador, fundamental na mudança dos paradigmas vigentes, unindo o bem estar social, econômico e ambiental no sentido prático e real da sustentabilidade (COOPER *et al.*, 2010). Assim, enxerga-se a economia humana como parte do todo maior que é a natureza (CAVALCANTI, 2010; SANTOS, 2020).

Além disso, é de extrema importância a criação de um vínculo pessoal com o adubo, especialmente com o processo de trabalhá-lo (STEINER, 1977; STEINER, 2017). O homem é dotado de capacidades que quer exercitar. Ele é um ser de participação e de criação, que quer ser o sujeito de sua história (BOFF, 1995). Isso é proporcionado pela compostagem, em que se busca o ganho de tempo e espaço por meio do trabalho e do saber (PINHEIRO, 2011).

Nesse sentido, a compostagem é um procedimento que visa acelerar e direcionar o processo de decomposição de materiais orgânicos que ocorre espontaneamente na natureza, mas que, com maior influência das variações dos fatores ambientais, tem sua estabilização protelada. No Brasil, os métodos mais usados são a compostagem em pilhas ou em leiras, com aeração natural ou forçada, podendo ser estáticas ou movimentadas no pátio de compostagem (BERTON *et al.*, 2021), adaptável as distintas realidades de infraestrutura e matérias primas. Em um processo de compostagem bem conduzido, a temperatura varia de acordo com quatro fases principais: fase mesofílica inicial, fase termofílica, fase mesofílica de resfriamento e maturação.

Na fase mesofílica inicial da compostagem, com duração entre um e sete dias e temperaturas entre 30 e 45°C, se exige alta necessidade de revolvimento e ocorre a expansão das colônias de microrganismos mesófilos, intensificação da ação de

decomposição, liberação de calor, elevação rápida da temperatura, formação de ácidos orgânicos e queda de pH. Em sua fase termófila, que dura entre 12 e 16 dias e é caracterizada por temperaturas acima de 45°C, ocorre intensa decomposição do material, aumento do pH e domínio de bactérias. Com a maior parte do material orgânico degradado, na fase mesófila de resfriamento, que leva de 15 a 20 dias, ocorre a degradação de substâncias orgânicas mais resistentes, redução de carbono e da atividade microbiana, com conseqüente queda de temperatura da leira e perda de umidade, com o domínio de bactérias, fungos e actinomicetos, estando o composto já bioestabilizado ou semicurado. Por fim, na maturação, com a atividade biológica baixa, ocorre a formação de substâncias húmicas e mineralização da matéria orgânica e o composto perde a capacidade de auto aquecimento, apresentando a temperatura ambiente, com o fertilizante já entendido como curado. Esta fase persiste entre 15 e 60 dias (Figura 1) (INÁCIO; MILLER, 2009).

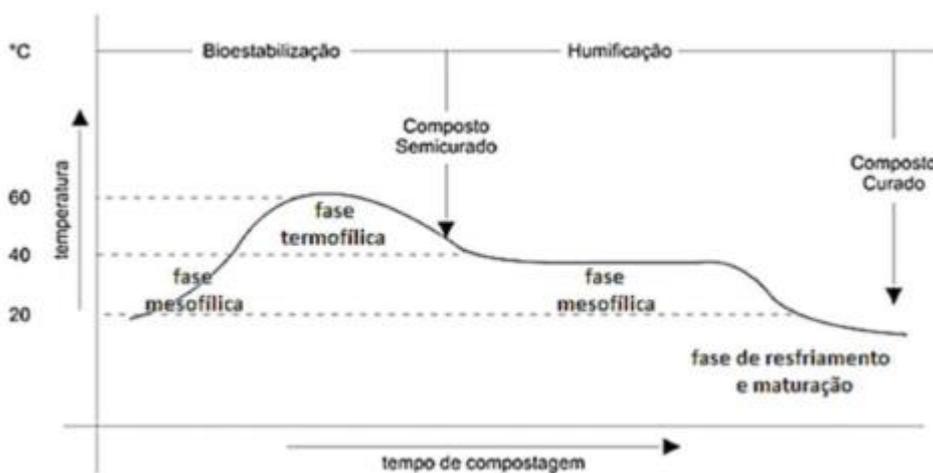


Figura 1 - Fases da compostagem. Fonte: Dal Bosco *et al.* (2017).

Compostados, os sólidos biodegradáveis da matéria orgânica são convertidos para um estado estável que pode ser manejado, estocado e utilizado como adubo orgânico, denominado composto, sem efeitos nocivos ao ambiente (ORRICO *et al.*, 2007), com odor leve, características completamente diferentes do material de origem (CANTÚ *et al.*, 2022) e maior facilidade de aplicação. Ao contrário do esterco fresco, o composto maduro e minerais de ação lenta, como pós de rochas, dificilmente são superdosados (KOEPEL *et al.*, 1983).

No entanto, a eficiência do processo de compostagem está diretamente relacionada a fatores que proporcionam condições ótimas para que os microrganismos aeróbios possam se multiplicar e atuar na transformação da matéria orgânica. O conjunto de fatores condicionantes para o bom desenvolvimento de um sistema biologicamente

complexo como a compostagem deve ser balizado por uma série de parâmetros, sendo eles uma combinação ótima de umidade, aeração, temperatura, pH, relação C:N, granulometria e dimensões da leira (VALENTE *et al.*, 2009). Isto é, os microrganismos precisam de compostos de carbono como fonte de energia, nitrogênio para produção de suas proteínas e oxigênio e água em proporções ideais para sua sobrevivência, fatores influenciados pela granulometria do material e pela altura e largura da leira. Todavia, embora se busquem as condições ótimas de compostagem, são necessárias, ainda, bases científicas que as expliquem, pois se trata de um processo ecológico complexo (KIEHL, 2004).

A relação C:N é um índice utilizado para avaliar a composição e os níveis de maturação de substâncias orgânicas e seus efeitos no crescimento microbiológico, já que a atividade dos microrganismos heterotróficos envolvidos no processo depende tanto do conteúdo de C para fonte de energia, quanto de N para síntese de proteínas (SHARMA *et al.*, 1997), reprodução e crescimento celular (SUSZEC, 2005). O valor ideal deste parâmetro para iniciar o processo de compostagem está entre 25:1 e 35:1 (FONG *et al.*, 1999), para que o processo de imobilização de N predomine em relação à mineralização deste nutriente (CHEN, *et al.*, 2014; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Relações muito baixas causam perdas praticamente inevitáveis de nitrogênio na forma de amônia, enquanto os valores mais altos tornam o processo mais prolongado (COTTA *et al.*, 2015). Na prática, contudo, estudos realizados com diferentes fontes de resíduos apresentam uma variação grande na relação C:N inicial, de 5:1 até 513:1, indicando ser possível a ocorrência da compostagem mesmo em valores fora da faixa de relação ótima. A proporção idealizada reconhecidamente caracteriza a melhor condição para a evolução do processo, mas se, por exemplo, parte do carbono disponível é de difícil degradação (celulose, hemicelulose e lignina) é aconselhável que a relação C:N inicial seja maior, pois o carbono biodisponível é inferior ao carbono total mensurado (DAL BOSCO *et al.*, 2017).

Durante o processo de compostagem, verifica-se uma redução da relação C:N em decorrência da oxidação e do consumo como fonte de energia da matéria orgânica pelos microrganismos, que liberam CO<sub>2</sub> através da sua respiração e do calor (ZHANG ; HE, 2006), diminuindo assim a concentração de C, já que sua demanda é maior que a de N (VALENTE, *et al.*, 2009). A compostagem ideal é terminada com relação C:N menor que 15, para fornecer grandes quantidades de nutrientes para as culturas subsequentes (HAYNES, 1986), uma vez que, quando os processos de mineralização predominam em

relação aos de imobilização, a matéria orgânica funciona como fonte de nutrientes, aumentando a disponibilidade destes às plantas (PAUL; CLARK, 2007). Já Rasapoor *et al.* (2016) indicam que um composto está maturado com a relação C:N menor ou igual a 20. Isto é, a matéria orgânica estabilizada é caracterizada, de modo geral, pelo fato de apresentar uma relação C:N que indica que o processo de mineralização do nitrogênio prevalece sobre a sua imobilização (SILVA *et al.*, 2013). Se esta proporção não estiver adequada e houver excesso de carbono, haverá falta de nitrogênio, o que resulta na retirada deste elemento do solo (COTTA *et al.*, 2015).

No processo de decomposição da matéria orgânica, a umidade ideal para a compostagem, entre 50 e 60%, garante a atividade microbiana (RODRIGUES *et al.*, 2006). Materiais com menos de 30% de umidade inibem a vida, sendo que um meio com umidade acima de 65% proporciona uma decomposição lenta, condições de anaerobiose e lixiviação de nutrientes (RICI; NEVES, 2004). Um teste rápido para se conhecer a umidade da leira consiste em se apertar o composto com as mãos. Se o composto soltar água como uma esponja que já foi espremida antes, ele se encontra com o teor adequado de umidade (PENTEADO, 2010).

A aeração é classificada como o principal mecanismo capaz de evitar altas temperaturas durante o processo de compostagem, de aumentar a velocidade de oxidação, de diminuir a liberação de odores, de reduzir o excesso de umidade de um material em decomposição (PEREIRA-NETO, 1996) e de expor as camadas externas as temperaturas mais elevadas (FERNANDES; SILVA, 1999). O oxigênio é de vital importância para os microrganismos que realizam a decomposição dos resíduos orgânicos, já que a decomposição é um processo de oxidação biológica das moléculas ricas em carbono, com liberação de energia. Essa energia então é consumida pelos organismos (PEIXOTO, 1988). A quantidade necessária de oxigênio para a compostagem depende do estágio em que ela se encontra. Nas primeiras etapas, de rápida degradação, verifica-se uma grande necessidade para a realização adequada do processo. Já nas etapas finais, com a redução da atividade microbiana, condições menos oxidativas são mais adequadas, pois a necessidade de oxigênio é menor (ANDREOLI *e al.*, 2001).

Massukado (2008) afirma que os revolvimentos da leira de compostagem devem ser feitos obrigatoriamente em algumas situações: quando a temperatura estiver acima do 70°C, ou a umidade estiver acima de 60% ou quando há presença de moscas e maus odores. Todavia, Kiehl (2004) ressalta que em condições de aparente normalidade, mas que não se tenha realizado revolvimento em um período considerável, é indicado fazê-lo,

para que se introduza ar rico em oxigênio e se libere o ar saturado de gás carbônico. Pereira-Neto (2007) afirma que a frequência de retorno recomendável é de aproximadamente duas vezes por semana, mas ressalta que realizar revolvimentos de forma demasiada pode afetar negativamente a dinâmica do nitrogênio no composto.

A temperatura também é um dos fatores de grande relevância no processo de transformação da matéria orgânica. Possui fácil mensuração e indica diretamente a eficiência da oxidação da matéria orgânica. Na fase termofílica da compostagem, há proliferação de microrganismos exotérmicos, que promovem aumento da temperatura da leira de composto, com efetivo poder na eliminação de patógenos e sementes de plantas daninhas. É desejável que esta varie de 60 a 70°C nos primeiros 25 dias de compostagem e depois, no período de maturação, naturalmente a temperatura diminui (ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2009). Os microrganismos patogênicos e as sementes infestantes são normalmente destruídos em curto período com temperatura acima de 55°C (MISRA *et al.*, 2003).

A granulometria dos materiais interfere na dinâmica do processo de compostagem. A decomposição da matéria orgânica é um fenômeno microbiológico cuja intensidade está relacionada à superficial específica do material a ser compostado, sendo que, quanto menor a granulometria das partículas, maior será a área superficial que poderá ser atacada e digerida pelos microrganismos, acelerando o processo de decomposição (KIEHL, 1985; LIU *et al.*, 2018). A granulometria ideal é de resíduos com dimensões entre 1 e 5 cm, pois resíduos com dimensões menores podem ser facilmente compactados e encharcados, dificultando a aeração, enquanto resíduos de tamanhos maiores podem prolongar o tempo de decomposição (MAGALHÃES *et al.*, 2021).

O correto dimensionamento das leiras é também de suma importância para o processo de compostagem. Uma leira deve ter um tamanho suficiente para impedir a rápida dissipação de calor e umidade e, ao mesmo tempo, permitir uma boa circulação de ar (RODRIGUES *et al.*, 2006). A altura do material deve estar entre 1,5 m e 1,8 m e, a largura, entre 1,2 a 1,8 m (KIEHL, 2004). Pilhas muito altas submetem as camadas inferiores à compactação. Pilhas baixas perdem calor mais facilmente. (COOPER *et al.*, 2010). Em relação ao terreno, é importante que as leiras estejam em local com pouca declividade (até 5%), porém não plano, para facilitar o preparo e o manejo da pilha de composto, mas que também permita drenagem da água da chuva (RICI; NEVES, 2004).

O tempo para a decomposição da matéria orgânica depende de vários fatores. Quanto mais próximo do ideal forem as condições da temperatura e umidade, mais rápido

será o processo. Se os materiais forem de pequenas dimensões, a umidade for adequada e a pilha for revolvida semanalmente, o composto será estabilizado dentro de 30 a 60 dias, e curado entre 90 a 120 dias. Percebe-se que o composto está pronto quando não ocorre perda de água, apresenta cor escura, está solto e com cheiro de terra (PEREIRA-NETO, 1996). Segundo a Instrução Normativa 61 de 8 de julho de 2020 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, para comercializar compostos orgânicos sólidos como fertilizante, ele deve atender os seguintes critérios de qualidade: umidade < 50%, nitrogênio total > 0,5%, carbono orgânico > 15% e relação C:N máxima de 20 (MAPA, 2020).

A aproximação da temperatura do composto à temperatura ambiente é um indicativo do equilíbrio microbiológico, entretanto, não pode ser utilizada como único parâmetro na verificação de maturidade do composto (VALENTE *et al.*, 2009). Kiehl (2004) afirma que o pH do composto neutro ou quase neutro revela um produto estabilizado; quando alcalino, o composto está humificado. A relação C:N próxima de 18 indica um fertilizante semicurado e, entre 10 e 18, um produto curado. Com este parâmetro abaixo de 10, poderá ocorrer perda de nitrogênio amoniacal. De modo geral, considera-se que 50% do N, 60% do P e 100% do K presentes no composto sejam liberados no primeiro ano de cultivo. (BERTON *et al.*, 2021)

Com o fim da fase termofílica, considera-se que o composto está estabilizado, porém não maturado ou humificado (BERTON *et al.*, 2021). Segundo Epstein (1997), a estabilização é um estágio de decomposição da matéria orgânica com influência da atividade biológica, já a maturação é uma condição organo-química do composto que indica a presença ou ausência de ácidos orgânicos tóxicos e a presença de moléculas húmicas ou que estão sendo humificadas.

Contudo, em clima tropical, o efeito da matéria orgânica não decomposta é muito valorizado, uma vez que ocorrem etapas no processo de decomposição que melhoram a estrutura do solo e que são eliminados durante a compostagem, o que resulta num produto parcialmente estabilizado em termos biológicos. O que se quer não é nutrir a planta com NPK orgânico, mas fornecer alimento para os organismos do solo, de forma que seja promovida uma melhor agregação do solo, criando poros por onde deve entrar ar e água. (PRIMAVESI, 2021). Por isso, em alguns locais no Brasil, tem-se terminado o manejo da compostagem antes da fase de maturação, para que essa fase ocorra na lavoura. Magalhães *et al.* (2021), por exemplo, consideraram o composto feito com resíduos da agroindústria do palmito pronto com 45 dias. Isto é, pode-se utilizar compostos

estabilizados, mas menos maturados, desde que aplicados com antecedência em relação ao plantio das culturas (BRITO *et al.*, 2017), porque as moléculas mais facilmente biodegradáveis que ainda existem serão mineralizadas pelos microrganismos do solo (SILVA, 2019). Assim, ainda diminui-se o tempo de execução da compostagem e a perda de N e C e aumenta rendimento em toneladas de matéria seca do produto final.

Portanto, nos trópicos, um solo saudável é aquele com elevada diversidade biológica, já que ele é pobre quimicamente e dependente de rápida e intensa ciclagem da matéria orgânica (PRIMAVESI, 2006). Melhorando as condições do solo, e com isso das plantas, restabelecem-se os equilíbrios naturais e assim se acionam os processos de autodefesa das plantas. Os pivôs desses processos são matéria orgânica para o solo e a vida diversificada, bem como o fornecimento de macro e micronutrientes para as plantas, o fortalecimento de seu sistema radicular (PRIMAVESI, 2016) e a proteossíntese estimulada pela fertilização orgânica (CHABOUSSOU, 2006).

Parte do composto pode ser de origem mineral. Se pode utilizar rochas moídas com a finalidade de aumentar a atividade biológica no processo de compostagem e a solubilização dos minerais existentes nas rochas, desta forma aumentando o potencial agrônômico do adubo (ISHIMURA *et al.*, 2006).

### 2.2.3 - Compostagem conjunta de materiais orgânicos e rochas moídas

Muito embora a compostagem conjunta de pós de rochas e materiais orgânicos seja benéfica para o beneficiamento biológico dos remineralizadores e para a qualidade final do composto orgânico (ISHIMURA *et al.*, 2006; THEODORO, 2020), a literatura aponta que existem mais estudos tratando a aplicação dos compostos ou materiais orgânicos e pós de rochas como dois produtos separados, ainda que aplicados de forma concomitante (BAMBERG *et al.*, 2023; BASAK, *et al.*, 2020; CAMPBELL, 2009; HALLER, 2011; JONES *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2020; O'BRIEN *et al.*, 1999; ROCHA, 2006; SWOBODA *et al.*, 2022; 2016; TAVARES *et al.* 2018; THEODORO *et al.*, 2012). Isto é, há poucas informações sobre a introdução das rochas moídas no processo de compostagem.

Existem alguns trabalhos que estudam o uso de rochas moídas na compostagem tendo como foco como o uso desse material afeta o processo de compostagem, sem avaliar a qualidade do produto final ou sem analisar os resultados da aplicação desse adubo em plantas. Sikora (2004) não encontrou benefícios nas fases iniciais de compostagem e

somente pequenos aumentos da temperatura do composto durante a maturação com o uso de pó de basalto com esterco bovino. Já Graham (2001) e Szmidt (2004) constataram aumentos significativos na temperatura da leira de compostagem envolvendo uma mistura de basalto moído com *glacial silt* (sedimento fino de origem glacial) e carcaças de aves. Além disso, estes autores perceberam a diminuição dos teores de amônia e maior retenção de nitrogênio nos compostos com pó de rocha.

Ocorrem ainda pesquisas que tratam de estratégias de beneficiamento biológico de minerais. Basak *et al.* (2021) notaram que o uso de microrganismos solubilizadores de potássio foi uma boa alternativa para bioativação do mineral mica, com consequente impacto positivo na nutrição de K no sistema solo-planta. Semelhantemente, Taverne (2017) realizou diversos testes adicionando minerais na compostagem com matéria orgânica fresca, observando que a adição de minerais durante a compostagem induziu uma diminuição da emissão de carbono. Além disso, o uso desse produto como condicionador de solo permitiu aumentar o armazenamento de carbono no solo em comparação a um composto normal sem a adição de minerais. Entretanto, embora as características físico-químicas dos produtos finais fossem ideais para seu uso, nenhum aspecto benéfico sobre o crescimento da planta *Arabidopsis thaliana* foi observado.

Já von Fragstein e Vogtmann (1983) utilizaram outra forma de biointervenção. Eles trataram quatro pós de rochas (granito, basalto, diabásio e rocha vulcânica) com quatro extratos orgânicos (concentrado de aminoácidos, levedura de cerveja, extrato de algas de *Ascophyllum nodosum* e urina de gado). A relevância do aumento de macro e microelementos solúveis nos vários extratos foi avaliada por comparação com os fertilizantes líquidos inorgânicos disponíveis. Os teores de nutrientes presentes nos extratos resultantes foram superiores ao fertilizante líquido disponível no mercado.

Nota-se, todavia, que já existem estudos que avaliam a eficácia do processo de compostagem na melhoria da liberação de nutrientes das rochas moídas. Tavares et al. (2018) constataram que o uso de fonolito como componente inicial na compostagem com serragem, esterco de gado e resíduos de polpa de frutas potencializou a biorrelação de nutrientes da fonte mineral. Badr (2006) concluiu que o potássio disponível liberado de um feldspato potássico aumentou acentuadamente quando este foi adicionado a uma compostagem com palha de arroz. Lima e Gomes (2011) concluíram que o enriquecimento mineral com pós de rochas de serpentinito e micaxisto possibilitou elevação dos teores de nutrientes tanto nos compostos à base de borra de vinhaça quanto

naqueles à base de cama de galinha, além de favorecer a atividade biológica e acelerar o processo de compostagem.

Embora hajam alguns estudos tratando da compostagem conjunta de resíduos orgânicos e pós de rocha, mais estudos são necessários para determinar os tipos de rochas moídas mais adequados para uso na compostagem, bem como sua proporção na leira de compostagem e o seu efeito na qualidade do composto (SZMIDT; FERGUSON, 2004). As pesquisas existentes sobre o uso de rochas moídas no processo de compostagem indicam benefícios, mas várias questões permanecem em relação à qualidade dos produtos e suas proporções ideais. Nesse sentido, é essencial estudos que avaliem a qualidade de um adubo produzido em compostagem conjunta de rochas moídas e resíduos orgânicos. Koepf *et al.* (1983) apontaram que é vantajoso ter-se um mínimo de 5-10% de pó de basalto em qualquer composto, mas não mais que 30%. Curtis *et al.* (2023) constataram, em ensaio de incubação, que a adição de 30% de pó de basalto na cama de frango foi o tratamento que apresentou maior atividade microbiana e menor perda de nitrogênio, que a adição de uma maior proporção de pó de rocha resultou na redução dos teores de P e K extraíveis e que a adição de 10% produziu o composto com a maior quantidade de nutrientes.

Khatounian (2001) aponta que a utilização de pós de rocha está associada à ativação biológica do sistema. Com proporção correta entre a parte orgânica e mineral não se interfere negativamente na atividade microbiana do composto e se possibilita o aproveitamento das temperaturas e os ácidos formados durante o processo de compostagem para propiciar e acelerar reações entre as duas porções (orgânica e mineral). Assim, parte desses minerais ficam disponíveis e ao mesmo tempo protegidos (ligados à parte orgânica) de perdas por volatilização, lixiviação e adsorção.

### **3- HIPÓTESES**

- É possível produzir na fazenda um composto orgânico, com fontes regionais de nutrientes, de boa qualidade agronômica;

- Existe um limite de percentual de pó de rocha para ser utilizado na compostagem. A partir desse limite, o pó de rocha atrapalha o manejo da compostagem e seu desenvolvimento biológico;

- Diferentes tipos de pós de rochas utilizados na compostagem pedem um manejo diferente;

- A compostagem libera nutrientes das rochas moídas;

- A adubação com composto orgânicos enriquecido com rochas moídas regionais melhora as características do solo, a qualidade da bebida e aumenta a produtividade do cafeeiro, quando comparada com a adubação convencional.

#### **4- OBJETIVO GERAL**

Avaliar fertilizantes produzidos por compostagem conjunta de resíduos orgânicos e rochas moídas e seus efeitos sobre o solo, sobre a produtividade das lavouras de café e sobre o café produzido.

##### **4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Avaliar a qualidade dos compostos elaborados com fontes regionais de nutrientes (FRN);
- b) Analisar a compostagem com diferentes teores de pó de rocha no composto;
- c) Averiguar compostagens com três diferentes pós de rochas;
- d) Comparar o comportamento de parâmetros químicos e biológicos dos solos adubados com fertilizantes industrializados e com FRN;
- e) Comparar a produtividade e a qualidade de bebida dos cafés produzidos com fertilizantes industrializados e com FRN;

# **CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE UM FERTILIZANTE PRODUZIDO POR COMPOSTAGEM CONJUNTA DE MATERIAIS ORGÂNICOS E ROCHAS MOÍDAS<sup>1</sup>**

## **QUALITY ASSESSMENT OF A FERTILIZER PRODUCED BY JOINT COMPOSTING ORGANIC MATERIALS AND ROCK DUSTS**

### **RESUMO:**

Ao longo de milhares de anos, diferentes povos realizaram uma agricultura baseada no manejo dos materiais disponíveis nas propriedades rurais. Uma das formas para se atingir essa condição é a produção e uso de compostos orgânicos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade do composto orgânico produzido com fontes de nutrientes de origem regional em uma propriedade rural. As matérias primas utilizadas para a produção do fertilizante foram cama de bovino, serragem, casca de café, gesso e pó de rocha. A compostagem foi iniciada com relação C:N entre 25 e 35 e terminada com relação C:N menor que 15. A realização da aeração do condicionador foi feita com um compostador e, a umidificação, com um tanque pipa. As análises química, orgânica, biológica e sanitária indicam que o processo de compostagem foi realizado de forma correta. Com isso, o composto exibiu a maioria das garantias mínimas para ser enquadrado como fertilizante orgânico composto classe A, o que pode melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo, aumentando a autonomia do agricultor e diminuindo sua dependência dos combustíveis fósseis.

**Palavras-chave:** Adubo; Agrominerais regionais; Autossuficiência; Sustentabilidade agrícola.

### **ABSTRACT:**

Over thousands of years, different peoples have carried out an agriculture based on the management of the materials available in rural properties. One of the tools to achieve these conditions is the production and use of organic compounds. This study aimed to evaluate the quality of an organic fertilizer made from regional sources of nutrients on farm. The raw materials used for the production of the fertilizer were cattle litter, sawdust, coffee husks and rock dusts. Composting started with a C:N ratio between 25 and 35 and ended with a C:N ratio less than 15. Aeration of the fertilizer was done with a composter and humidification with a water tank. Chemical, organic, biological and sanitary analyzes indicate that the composting process was carried out correctly. As a result, the compost produced on the rural property has good quality and exhibited most of the minimum guarantees to be classified as a class A organic fertilizer, which can improve the the

---

<sup>1</sup> Trabalho publicado na Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 15, n.3 2022.

physical, chemical and biological conditions of the soil, increasing the farmer's autonomy and decreasing his dependence on fossil fuels.

**Keywords:** Local fertilizer; Regional agrominerals; Self-sufficiency; Agricultural sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo de milhares de anos, diferentes povos realizaram uma agricultura baseada no manejo dos materiais disponíveis nas propriedades rurais (ESPÍNDOLA *et al.*, 1997). Buscava-se otimizar o uso dos recursos locais na condução dos agroecossistemas, no manejo do solo e na condução da produção por meio dos métodos biológico-vegetativos, sem o uso de agroquímicos, que até então eram desconhecidos dos agricultores (COSTA, 2017).

Contudo, o livro de Justus von Liebig, de 1840, “A química em sua aplicação na agricultura e fisiologia”, provocou uma mudança radical na nutrição das plantas, por meio de suas teorias de fertilização para manter as condições produtivas do solo, além de fornecer as leis básicas da agronomia industrial. Este trabalho provocou uma grande alteração no conhecimento e prática sobre a nutrição das plantas. Nele foi formulada a teoria mineral de nutrição das plantas (PINHEIRO *et al.*, 1985; PINHEIRO, 2018). Com isso, já no final do século XIX, na Europa, a agricultura foi transformada por descobertas científicas que abriram caminho para o uso de fertilizantes solúveis. Os aumentos de produtividade decorrentes da utilização de tais produtos fizeram com que vários agricultores abandonassem as práticas de adubação com fontes locais ou regionais de nutrientes, aderindo a um modelo de agricultura cada vez mais dependente de insumos externos às propriedades (JESUS, 1985).

No entanto, sabe-se que a matéria orgânica desempenha um papel importante na manutenção da qualidade e produtividade do solo, atuando como fonte de energia, promovendo a diversidade biológica e melhorando a composição dos ecossistemas terrestres (MARTINS *et al.*, 2015). O manejo e as práticas do solo devem garantir a manutenção ou o aprimoramento das características biológicas, químicas e físicas do solo, proporcionando consequentemente uma produção sustentável e a adequada produtividade das culturas (LOPES *et al.*, 2015). Uma das ferramentas para se atingir essas condições é a produção e uso de compostos orgânicos. O composto é oriundo do manejo humano de

resíduos agrícolas na propriedade tendo em vista ganho de tempo e espaço por meio do trabalho e saber (PINHEIRO, 2011).

A compostagem é um procedimento que visa acelerar e direcionar o processo de decomposição de materiais orgânicos, que ocorre espontaneamente na natureza. Em sua fase inicial, ocorre a expansão das colônias de microrganismos mesófilos e a intensificação da decomposição, da liberação de calor e da elevação rápida da temperatura. Em seguida, na fase termófila, caracterizada por temperaturas acima de 45°C, ocorre intensa decomposição do material, com formação de água metabólica e manutenção de geração de calor e vapor d'água. Posteriormente, na fase mesófila ocorre a degradação de substâncias orgânicas mais resistentes, redução da atividade microbiana e, conseqüentemente, queda da temperatura da leira e perda de umidade. Por fim, na maturação, a atividade biológica é baixa e ocorre a formação de substâncias húmicas (INÁCIO; MILLER, 2009). Com isso, os sólidos biodegradáveis da matéria orgânica são convertidos para um estado estável que pode ser manejado, estocado e utilizado como fertilizante orgânico sem efeitos nocivos ao ambiente (ORRICO *et al.*, 2007).

Ressalta-se, ainda, que parte do composto pode ser de origem mineral. A técnica de inserir pós de rochas na compostagem enriquece o teor de nutrientes do produto e acelera a solubilização dos minerais das rochas, fatos que aumentam o potencial agrônômico do adubo (ISHIMURA *et al.*, 2006). Em muitos casos, as rochas silicáticas moídas são misturadas a compostos orgânicos e a liberação dos nutrientes pode ser acelerada por meio de mecanismos físico-biológicos controlados (ROCHA, 2006; THEODORO *et al.*, 2012). Inserir o remineralizador no processo de compostagem é uma forma de beneficiamento biológico do produto. Os microrganismos presentes no composto aceleram, por meio dos ácidos húmicos, a quebra dos compostos químicos presentes, especialmente nos argilominerais, liberando, dessa forma, uma maior porcentagem de nutrientes para as plantas. Assim, fertilizantes de proveniência geológica local podem ser usados em conjunto com medidas biológicas (CHESWORTH *et al.*, 1989; PINHEIRO, 2018; TAVARES, 2017).

A eficiência do processo de compostagem está diretamente relacionada a fatores que proporcionam condições ótimas para que os microrganismos aeróbios possam se multiplicar e atuar na transformação da matéria orgânica. O conjunto de fatores condicionantes para o bom desenvolvimento de um sistema biologicamente complexo como a compostagem deve ser balizado por uma série de parâmetros, sendo eles uma

combinação ótima de umidade, aeração, temperatura, relação C:N, pH e altura da leira (VALENTE *et al.*, 2009).

Além da otimização do uso dos recursos disponíveis internamente no sistema agrícola propiciar a redução da dependência da agricultura de energia externa, nos trópicos, a maior concentração de nutrientes contidos no complexo solo-planta está na biomassa e não no solo, que na maioria dos casos é ácido e distrófico, devido à elevada lixiviação de nutrientes carregados pelos excedentes hídricos de chuvas torrenciais (COSTA, 2017). Neste sentido, o aporte de macro e micronutrientes deve ser feito através de produtos de baixa concentração e solubilidade (PRIMAVESI, 2002). Com isso, nos trópicos, um solo saudável é aquele com elevada diversidade biológica, pois ele é pobre quimicamente e dependente da rápida e elevada ciclagem da matéria orgânica (PRIMAVESI, 2016).

No entanto, mesmo considerando a possibilidade de se mobilizar recursos locais e regionais, adequados para condições tropicais e para solos com baixa capacidade de retenção de cátions, 83% do total dos fertilizantes consumidos no país são derivados de fontes convencionais de nutrientes importadas, compostas essencialmente de variantes de NPK (ANDA, 2022), de elevada concentração e alta solubilidade (RODRIGUES, 2009). Com isso, nota-se que o modelo de agricultura industrial é dependente dos combustíveis fósseis (ALTIERI, *et al.*, 2015) e expõe com nitidez o caráter do processo que se realiza no sistema econômico moderno: um processo linear, do tipo extrai-produz-descarta (CAVALCANTI, 2012). Em contrapartida, a técnica da compostagem reflete a ideia de se entender a agricultura de forma cíclica, enxergando a economia humana como parte do todo maior que é a natureza (CAVALCANTI, 2010; SANTOS, 2020).

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade de um composto orgânico produzido com fontes regionais de nutrientes em uma propriedade rural.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

A produção do composto orgânico enriquecido com pós de rochas foi realizada em uma propriedade rural situada em Unaí (MG), próximo ao Distrito Federal (IBGE, 2017), no bioma Cerrado (IBGE, 2012). Na fazenda se produz café, lavouras temporárias e bovinos. O local situa-se em área classificada como clima tropical do Brasil Central com quatro a cinco meses secos. Apresenta como principal característica uma redução

dos totais pluviométricos durante a estação de inverno prolongada, possuindo, entre maio e setembro, um período considerável de estiagem. A média pluviométrica anual é de 1600 mm e a temperatura média anual é de 21,1°C (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Pela classificação de Köppen, o clima é classificado como Aw, caracterizado como clima tropical com estação seca no inverno (AYOADE, 2003).

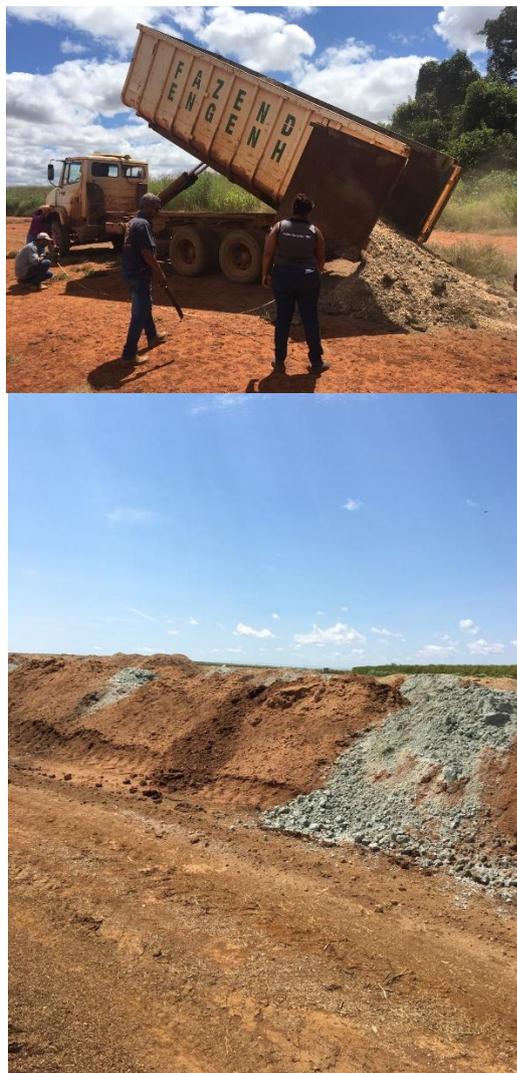
Os componentes utilizados para a produção do composto foram cama de bovino, serragem, casca de café, pós de rochas e bioativador (Tabela 1). A cama de bovino foi constituída de casca de café e dejetos de bovinos, produtos disponíveis dentro da fazenda. A casca de café foi colocada em um confinamento sem cobertura atendendo o critério de espessura mínima de 10 cm de cama (MATTOS, 1997). Os bovinos ficaram por 90 dias, período do confinamento, excretando seus resíduos sobre esta cama. Após esse período, 450 m<sup>3</sup> deste produto foi retirado para formação de 160 m linear de leira e realização da compostagem. Na cama enleirada, para elevar o teor de carbono do adubo, foram acrescentados 352 kg de serragem/m linear de leira e 306 kg de casca de café/m linear de leira, disponíveis na fazenda, além de ter sido aplicado, no início do processo de compostagem, 5 L/t de composto em base úmida de bioativador comercial de base natural, que desencadeia processos enzimáticos que potencializam a degradação de resíduos, assim reduzindo o tempo de compostagem (BONFIM *et al.*, 2011).

**Tabela 1 - Materiais utilizados na compostagem e suas proporções em peso seco.**

<b>Material</b>	<b>Proporção no composto (%)</b>
Cama de bovino	36
Serragem	14
Casca de café	20
Gesso	5
Calcixisto	9
Fosfato natural	16

Também foram adicionados 65 kg de gesso/m linear de leira para minimizar a perda de N do esterco por volatilização (TUBAIL *et al.*, 2008), 180 kg de fosfato natural/m linear de leira para aumentar o teor de fósforo do fertilizante e 101 kg de calcixisto/m linear de leira, visando enriquecer, principalmente, os teores de cálcio, magnésio, potássio e silício do composto (Figura 2). Esse fosfato natural é um agromineral fosfático, retirado

em Pratápolis (MG), com 12% de Si, 23% de  $P_2O_5$  e 14% de Ca. Já o calcixisto é um agromineral silicático do Grupo Canastra, extraído em Luziânia, Goiás, registrado no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como remineralizador de solos com número 09345 10001-1. Esse material apresenta soma total de bases na forma de óxidos ( $CaO + MgO + K_2O$ ) em torno de 23 %, e 2,7% de  $K_2O$ , 44% de  $SiO_2$ , 7,5% de  $MgO$  e 13,5% de  $CaO$ . A mineralogia é composta por 40% de carbonatos e 60% na forma de silicatos, principalmente muscovita, biotita, clorita e quartzo. A granulometria apresenta mais que 80% passante na peneira de 0,3 mm.



**Figura 2 - Montagem das leiras.**

Todos materiais foram analisados separadamente em laboratório antes do início do processo compostagem e, considerando a proporção de cada um no produto, encontrou-se a relação C:N inicial entre 25 e 35, conforme recomendação de Inácio e

Miller (2009). Foram registrados diariamente a temperatura das leiras, a umidade, o cheiro, bem como as atividades realizadas para manutenção da aeração e do umedecimento. A temperatura foi medida com termômetro digital tipo espeto e a umidade do composto foi avaliada pelo tato.

A realização da aeração do composto foi feita com o compostador Jaguar JC 4000 e a umidificação foi realizada com um tanque pipa de 20 mil litros rebocável. Materiais com menos de 30% de umidade inibem a atividade microbiana, sendo que um meio com umidade acima de 65% proporciona uma decomposição lenta, condições de anaerobiose e lixiviação de nutrientes (RICI; NEVES, 2004). Já a aeração evita altos índices de temperatura durante o processo de compostagem, aumenta a velocidade de oxidação, diminui a liberação de odores e reduz o excesso de umidade de um material em decomposição (PEREIRA-NETO, 1996).

O manejo foi realizado em pátio aberto sobre piso de terra compactada. A leira de aproximadamente 1500 m<sup>3</sup> e 160 m de extensão possuía entre 1,2 e 1,5 m de altura e 1,8 a 2 m de largura e sua umidade foi mantida entre 50 e 60% até a fase de maturação. A temperatura das leiras foi mantida entre 60°C e 70°C por quatro semanas, atendendo o período de tempo e temperatura necessários para higienização dos resíduos sólidos orgânicos durante o processo de compostagem da Resolução nº 481, de 3 de outubro de 2017 (BRASIL, 2017). O processo de compostagem foi finalizado com 32,3% de umidade e 65 dias de manejo. Com o composto pronto, foram coletadas quinze subamostras em diversos pontos da leira, a uma profundidade de 30 cm, totalizando 20 kg de material coletado. Esse material foi misturado para formar uma amostra composta homogênea, da qual uma amostra de 1 kg foi enviada para o laboratório para análise no Laboratório Andrios, credenciado pelo MAPA, onde foram analisadas características químicas e biológicas do composto orgânico, consistindo de avaliação dos nutrientes, composição orgânica (BENITES *et al.*, 2003), análise sanitária (uso do kit COLItest® e testes de germinação conduzido em casa de vegetação) e biológica (TABATAI, 1994; DÖBEREINER *et al.*, 1995; KASANA *et al.*, 2008).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O produto exibiu a maioria das garantias mínimas para ser enquadrado como fertilizante orgânico composto classe A, conforme critérios estabelecidos pela Instrução Normativa nº. 23, de 31 de agosto de 2005 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2005), já que possui as matérias primas para tal, apresentou umidade menor que 40%, relação C:N menor que 18, pH maior que 6 e teor de nitrogênio maior que 1%. No entanto, ele apresentou teor de carbono orgânico menor que 15%. Ainda assim, este composto demonstrou características mais adequadas ao uso agrícola que o fertilizante oriundo da compostagem de resíduos agroindustriais estudado por Pedrosa *et al.* (2013), que, apesar de possuir umidade menor que 40% e relação C:N menor que 18:1, exibiu teor de nitrogênio menor que 1%.

As características químicas do composto orgânico produzido estão apresentadas na tabela 2. A presença de macronutrientes primários e secundários indicam que o produto é um fertilizante completo (WEINDORF *et al.*, 2011).

**Tabela 2 - Caracterização química do composto orgânico.**

Determinações*	Base seca	Base úmida	Parâmetros MAPA (2005)
pH (CaCl <sub>2</sub> )		7,8	> 5,5
Umidade 60-65° C (%)		32,20	< 40
N (%)	1,22		> 1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	2,10		-
K <sub>2</sub> O (%)	1,65		-
Ca (%)	5,37		-
Mg (%)	0,88		-
S (%)	0,21		-
Si (%)	4,8		-
Relação C:N	11		< 18
CTC efetiva (mmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )	340		-

\* pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 M determinação potenciometria; Umidade 60-65° determinação por umidade; Nitrogênio total digestão sulfúrica (Kjeldahl); Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) determinação por espectrofotômetro pelo método com a solução de vanadomolibdica; Potássio (K<sub>2</sub>O) fotometria de chama; Enxofre (S) gravimétrico de sulfato de bário; Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extração com HCl por espectrofotômetro de absorção atômica; Silício Korndörfer *et al.*, 2004; Relação C:N cálculo; Capacidade de troca de cátions (CTC) (BRASIL, 2017).

Legenda: MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento).

O pH final do composto encontra-se dentro da faixa considerada ótima (RODRIGUES *et al.*, 2006; PEREIRA-NETO, 2007), de forma semelhante aos valores encontrados em outros estudos (ABID; SAYADI, 2006; ARAÚJO; MORELI, 2007; DEON *et al.*, 2007; JAHNEL *et al.*, 1999). No início da compostagem é comum ocorrer a formação de ácidos orgânicos, que tornam o pH mais ácido, porém, com o passar do tempo, essas substâncias reagem com bases liberadas da matéria orgânica, gerando compostos de reação alcalina que aumentam o pH do composto (VALENTE *et al.* 2009). Portanto, o pH do composto final alcalino indica que o processo de compostagem ocorreu de forma adequada.

Com relação aos macronutrientes, a concentração deles no composto é determinada pelo teor dos mesmos em cada ingrediente utilizado na compostagem, tanto dos materiais orgânicos quanto dos pós de rocha utilizados para enriquecimento mineral. Com isso, cada região ou propriedade, vai utilizar os ingredientes disponíveis no local e, como os tipos de materiais variam muito, é comum a existência de compostos orgânicos com características químicas muito diferentes. Primo *et al.* (2010), em um composto produzido com talo de fumo triturado, esterco e rúmen de bovino, encontraram os percentuais de 1,64 de nitrogênio, 0,19 de fósforo, 2,38 de potássio, 0,73 de cálcio, 0,42 de magnésio e 0,26 de enxofre, apresentando menores teores de nitrogênio, potássio e enxofre e maiores concentrações de fósforo, cálcio e magnésio. Em relação exclusivamente aos teores de nitrogênio, fósforo e potássio, Sedyama *et al.* (2000) encontraram, em um composto oriundo de resíduos de leucena com esterco de suíno, os percentuais de 1,59, 0,27 e 0,98, respectivamente, sendo, portanto, apenas o teor de nitrogênio maior que o produto deste estudo.

Os altos teores de fósforo do composto produzido têm relação com a aplicação de fosfato natural na leira de compostagem, ao passo que os valores de cálcio e magnésio tem ligação com o uso dos agrominerais calcixisto e gesso. Além do cálcio, o potássio foi o único macronutriente em maior concentração quando comparado com os compostos elaborados por Silva *et al.* (2009), que utilizaram combinações de esterco de bovino com resíduos originados da extração de princípios ativos de plantas medicinais.

A elevada quantidade de silício do adubo está relacionada com o uso do agromineral silicático calcixisto. Este é um dos elementos que tem tido seu potencial confirmado como redutor da incidência e severidade de doenças em diversas culturas (CARVALHO *et al.*, 2012). A importância do silício está diretamente ligada à resistência mecânica das plantas e a estrutura esquelética e flexibilidade dos vegetais, diminuindo

sua vulnerabilidade ao ataque de pragas e doenças. A disponibilidade deste elemento para as plantas depende diretamente da ação de ácidos e enzimas, produtos gerados pela atividade microbiológica sobre as partículas das rochas e argilas (RESTREPO; PINHEIRO, 2010). Ressalta-se que essa é uma característica fornecida pelo próprio adubo orgânico.

De forma semelhante aos estudos de Sediya *et al.* (2000) e Silva *et al.* (2009), a relação C:N do fertilizante estudado demonstra a bioestabilização do material e a umidade de 32,20% está dentro do limite desejável (KIEHL, 1998), ao contrário do encontrado por Araújo e Moreli (2007), que analisaram alguns tratamentos de composto com capim elefante, esterco de galinha, capim gordura, palha de café e de feijão. Contudo, Jimenez e Garcia (1989) ressaltam que, devido às diferenças de materiais em cada compostagem, apenas uma relação C:N entre 20 e 10 não indica um material bioestabilizado.

De acordo com Kiehl (1988), materiais com valor de CTC maior que 100 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> são considerados de alto valor, como os compostos e vermicompostos de produtos envolvendo resíduos vegetais, esterco de bovino e serragem estudado por Cotta *et al.* (2015). Ainda assim, estes materiais não alcançam um valor de CTC tão elevado quanto o deste estudo, o que pode estar ligado com os minerais silicáticos secundários formados pelo intemperismo dos minerais primários dos pós de rochas utilizados (MARTINS *et al.*, 2010).

No entanto, o alto valor de CTC obtido no composto provavelmente está diretamente relacionado com os altos teores de matéria orgânica e carbono orgânico obtidos no composto (mesmo que este esteja abaixo do indicado pela legislação), especialmente devido a presença de substâncias húmicas (ácidos húmicos e ácidos fúlvicos) (Tabela 3), que são coloides eletronegativos com grande superfície específica (VALENTE *et al.*, 2009). Quanto maior o teor ácido húmico, mais elevada é a capacidade do composto de adsorver cátions (MELO *et al.*, 2008) e de liberar nutrientes para as plantas (ABREU-JÚNIOR *et al.*, 2005). O alto valor de CTC também demonstra o grau de maturação do composto, já que isso está relacionado com o processo de humificação da matéria orgânica (CEGARRA *et al.*, 1983). Sendo assim, o material húmico formado pela compostagem, em razão de suas propriedades coloidais, possui grande importância na constituição do solo, onde é fonte de nutrientes para a vegetação, favorecendo a estrutura do solo e a retenção de água, estabilizando os nutrientes ao longo do tempo (DICK; McCOY, 1993).

As substâncias húmicas possuem relação direta com o grau de maturação do composto. Os ácidos húmicos (AH) e fúlvicos (AF), componentes do húmus, são formados pela ação de microorganismos especializados que transformam os restos orgânicos em material humificado. O húmus possui propriedades físico-químicas inteiramente diferentes do material original e a predominância de ácidos húmicos sobre os fúlvicos no final da compostagem é um indicativo de humificação adequada dos resíduos avaliados conforme desejado, já que os ácidos fúlvicos contêm elementos facilmente degradáveis (SILVA *et al.*, 2009).

Portanto, a relação AH:AF é tida como referência para o grau de humificação de compostos orgânicos e quanto maior esta relação, mais humificado é o composto (IGLESIAS-JIMENEZ; PEREZ-GARCIA, 1992; RIFFALDI *et al.*, 1992). Jodice (1989) afirma que um composto bem humificado deve apresentar relação AH:AF maior que 1,5, mas Bernal *et al.* (1996) constatam que não é possível estabelecer um valor universal para descrever e prever o grau de maturação de compostos de composições distintas. Garcia-Gómez, Bernal e Roig (2005) encontram valor da relação AH:AF que variam 0,5 e 2,0 de acordo com o composto avaliado. Já Francou *et al.* (2005) diagnosticaram variações entre 1,2 e 4,3 em diferentes materiais compostados. Fialho *et al.* (2006) apontam que é fundamental que se identifique o período a partir do qual o composto pode ser considerado humificado, já que, caso aplicado ao solo antes desse processo, pode ser prejudicial ao desenvolvimento das plantas (FIALHO *et al.*, 2006).

Seguindo esses parâmetros, os resultados do laudo da análise orgânica demonstram que o composto produzido apresentou bom grau de maturação, mas ainda poderia ser mais humificado. Contudo, é possível, com um monitoramento diário da massa, encerrar a compostagem no início da maturação, considerando o efeito, em clima tropical, da matéria orgânica não decomposta na melhora da atividade biológica e estrutura do solo (PRIMAVESI, 2021).

**Tabela 3 - Determinação da composição orgânica do composto.**

<b>Determinações*</b>	<b>Base seca (65°C)</b>	<b>Parâmetro MAPA (2005)</b>
Matéria orgânica total (%)	26,67	-
Carbono orgânico (%)	12,89	> 15
C-AH (g.kg <sup>-1</sup> C org)	12,46	-
C-AF (g.kg <sup>-1</sup> C org)	10,44	-
Relação AH:AF	1,19	-

\*Carbono Orgânico (CO) oxidação dicromato seguido de titulação; Matéria Orgânica Total por combustão em Mufla (ALCARDE, 2009.), AH e AF: Benites *et al.*, 2003.

Legenda: AH: ácido húmico. AF: ácido fúlvico. MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

O composto produzido tem características que não causa nenhum efeito prejudicial ao desenvolvimento das plantas, visto que, conforme apontado no laudo biológico, a avaliação de germinação realizada com sementes de plantas indicadoras mostrou que o teste que recebeu composto obteve taxa de germinação maior do que no teste com apenas areia (Tabela 4), o que demonstra que o produto não apresenta substâncias prejudiciais para a germinação de sementes. Da mesma forma, Aquino (2003) também não encontrou fitotoxidez em teste de germinação com material oriundo de compostagem de resíduos domésticos.

Neste sentido, a comprovação de que a matéria orgânica do solo aumenta a capacidade produtiva dos solos, em particular, em solos situados sob clima tropical, tem incentivado o desenvolvimento de pesquisas visando melhor entendimento da sua dinâmica, especificamente de suas frações estáveis (PRIMO *et al.*, 2011), entendendo que, nos trópicos, a baixa fertilidade dos solos pode ser compensada por sua vitalidade (PRIMAVESI, 2006).

O laudo biológico também demonstrou que o composto apresenta característica de um inoculante de microrganismos benéficos para as plantas. Isto porque os microrganismos diazotróficos de vida livre, que são fixadores de nitrogênio atmosférico (HOFFMANN, 2007; SOUSA *et al.*, 2020), estão presentes em uma ordem de grandeza de quatro dígitos por grama de composto, assim como os microrganismos celulolíticos, que estão vinculados ao ciclo do carbono, decomposição da matéria orgânica e disponibilização de nutrientes (CERRI *et al.*, 1992), e apresentaram-se na ordem de seis dígitos. As enzimas  $\beta$ -glicosidade, indicadora de qualidade biológica do solo (PAZUTTI; CHAER, 2012) e relacionada com a ciclagem de carbono (PINHEIRO, 2011), e fosfatase ácida, associada ao ciclo do fósforo e reveladora da alta atividade de microrganismos

mineralizadores de fósforo (DICK; TABATABAI, 1993), também apresentaram ótimos teores no composto. Pinheiro (2011) afirma que tais enzimas são indicadores de saúde do solo e são produtos de altíssima rentabilidade comercial para as empresas de biotecnologia.

Assim, a funcionalidade desses grupos microbianos afeta diretamente a qualidade e a fertilidade do solo e contribui para o funcionamento dos ecossistemas (BROOKES, 1995), mas apresentam alta sensibilidade a variações químicas, físicas e biológicas no solo, normalmente provocadas por atividades antropogênicas (DORAN; ZEISS, 2000). Neste sentido, Carneiro (2000), estudando solos de mineração em diferentes estágios de recuperação, verificou que as atividades enzimáticas foram severamente afetadas pela mineração. Já Melo (2007) constatou que, de um modo geral, o uso do lodo de esgoto compostado aumenta a atividade enzimática do solo. Vinhal-Freitas *et al.* (2010) analisaram a atividade enzimática e microbiana em solo tratado com composto orgânico oriundo de resíduos domésticos e relataram que as enzimas  $\beta$ -glicosidase e a fosfatase ácida foram fortemente influenciadas pela adição do adubo, aumentando significativamente, assim como a atividade microbiana.

**Tabela 4 - Resultados de atividades enzimáticas, quantificação de microrganismos e testes de germinação.**

<b>Determinações</b>	<b>Valores</b>
Fosfatase ácida ( $\mu\text{g PNF.g}^{-1}$ de solo.h <sup>-1</sup> )	982
Beta-glicosidase ( $\mu\text{g PNG.g}^{-1}$ de solo.h <sup>-1</sup> )	517
Microrganismos celulolíticos (UFC.g composto <sup>-1</sup> )	4,3 x 10 <sup>6</sup>
Microrganismos diazotróficos (UFC.g composto <sup>-1</sup> )	2,4 x 10 <sup>4</sup>
Taxa de germinação P.I. – só areia (%)	80
Taxa de germinação P.I. – 1% de composto (%)	90

Coliformes totais e fecais kit COLtest® realizado conforme as especificações do fabricante. Determinação de presença ou ausência de plantas daninhas por testes de germinação conduzidos em ambiente controlado. Fosfatase ácida e beta-glicosidase: Tabatabai, 1994. Microrganismos: Kasana *et al.*, 2008 e Döbereiner *et al.*, 1995. Taxa de germinação de plantas indicadoras (P.I.) conduzida com experimentos em microcosmos em ambiente controlado utilizando sementes de alface. Legenda: PNF (Paranitrofenil fosfato). PNG (p-nitrofenil- $\beta$ -D-glicosídeo). UFC (unidade formadora de colônia). P.I. (planta indicadora).

Esse conjunto de inoculantes, acoplado a substâncias orgânicas complexas, altera para melhor a eficiência de absorção dos elementos minerais no solo, na medida em que favorecem a ativação biológica do mesmo. Conseqüentemente, a quantidade total necessária de aplicação desses elementos minerais diminui (IBA, 2020). Assim, as substâncias húmicas interagem com o material mineral, interferindo na dinâmica de

nutrientes no sistema solo-planta e exercendo um papel primordial na manutenção da fertilidade do solo, termo cujo o conceito global se estende também às propriedades físicas e biológicas (MENDOZA, 1996).

Em relação à análise sanitária, a ausência de coliformes totais e germinação de plantas indesejadas demonstra que a compostagem foi bem realizada e aqueceu até uma temperatura entre 60 a 70°C por um período mínimo e suficiente para eliminar microrganismos patogênicos e sementes viáveis de plantas daninhas. Alguns estudos demonstram que o aumento da temperatura da leira do composto devido à proliferação de microrganismos exotérmicos é essencial na eliminação de transmissores de doenças e de sementes de plantas indesejadas (PEREIRA-NETO, 1998; ZHU, 2007; PAIVA, 2008; ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2009; ORRICO-JÚNIOR *et al.*, 2010; HECK *et al.*, 2013). Araújo (2011) encontrou a presença de coliformes fecais em compostagem em campo com poda de árvores, lodo de esgoto e esterco de bovino em quatro tratamentos realizados, na presença ou ausência de cal. Ressalta-se, contudo, que a compostagem realizada nesse trabalho citado não alcançou a fase termofílica característica, o que afetou o processo de sanitização da massa.

Outros estudos apontam a importância da gestão dos resíduos e da busca de alternativas para substituição dos combustíveis fósseis em diversas realidades (ERTHAL; ZAMBERLAN; SALAZAR, 2019; BIANCHET *et al.*, 2020; MENDES *et al.*, 2020; MOTA; ANDRADE; LEITE, 2020; PERLIN *et al.* 2020; ROCCO; HENKES, 2020). O composto produzido neste estudo atende diversos critérios de qualidade, demonstrando que as características do composto orgânico feito com estas fontes regionais de nutrientes demonstram a possibilidade de os agricultores praticarem uma agricultura sustentável localmente, utilizando somente resíduos locais e materiais regionais, o que pode permitir a criação de uma nova realidade, proporcionando maior independência em relação ao mercado.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As análises química, orgânica, biológica e sanitária indicam que o processo de compostagem foi realizado de forma correta. Com isso, o composto produzido com fontes regionais de nutrientes possui boa qualidade e é passível de ser usado na agricultura, já

que atende a maioria requisitos necessários para ser enquadrado como fertilizante orgânico composto classe A.

A alta CTC, além de relacionado com a quantidade de matéria orgânica e carbono orgânico do composto, pode ter ligação com a utilização de pós de rochas na compostagem. Já o elevado valor de silício possui relação com o uso do agromineral silicático calcário na receita da compostagem.

O laudo biológico demonstra que o composto apresenta característica de um inoculante de microrganismos benéficos para as plantas, característica essencial para solos situados sob clima tropical, ainda que este não seja um quesito analisado nas garantias para comercialização de adubos.

## CAPÍTULO II - EFEITOS DE DIFERENTES PROPORÇÕES DE ROCHAS MOÍDAS NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM<sup>2</sup>

### Effects of rock dust's proportions in the process of compost making

#### RESUMO

Os fatores operacionais e econômicos geralmente determinam a dose máxima de composto aplicado por hectare, sendo que o uso de remineralizadores implica em uma diminuição da parte orgânica do adubo aplicado. Esse trabalho avaliou cinco tratamentos de compostagem e a qualidade de seus respectivos produtos finais. Para verificar a influência que os pós de rochas possuem no processo de compostagem e no fertilizante final, foram realizados tratamentos com proporções de material mineral de 15%, 30%, 45% e 60%, além de um tratamento testemunha sem parte mineral. Foram analisadas características químicas, biológicas, orgânicas e sanitárias do composto. Considerando todos os atributos avaliados pelo trabalho, o uso de mais de 30% de pó de rocha na compostagem atrapalhou o manejo e a atividade biológica.

**Palavras chaves:** fertilizante orgânico, agromineral silicático, resíduos, recursos locais.

#### ABSTRACT

Operational and economic factors normally define the maximum doses of compost that are used per hectare, and the use of remineralizer implies a decrease of the organic part of the applied compost. This paperwork analyzes five compost treatments and the quality of their respective final products. To verify the influence that rock dust has on the composting process and on final fertilizer, treatments were performed with mineral material proportions of 15%, 30%, 45% and 60%, in addition to a control treatment without mineral part. Chemical, biological, organic and sanitary characteristics of the compost were analysed. Considering all the attributes evaluated by the work, the use of more than 30% of rock dust in composting harmed management and biological activity.

**Key words:** organic fertilizer; silicate agromineral; waste; local resources

---

<sup>2</sup> Trabalho publicado na Revista Brasileira de Agroecologia, v. 18, n. 3 (2023).

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura convencional moderna está ligada à dependência completa dos agricultores de insumos importados na forma de *commodities*, envolvendo principalmente grandes máquinas, sementes, agrotóxicos e fertilizantes (CLEMENT, 1999). Contudo, uma alternativa para que o protagonismo seja principalmente do agricultor é a ênfase na adoção da tecnologia intermediária em vez das tecnologias capital-intensivas, na qual seja privilegiado o uso de mais mão de obra local e seja potencializado o uso dos recursos locais e regionais (COSTA, 2017). Neste sentido, produzir seu próprio adubo demonstra a evolução, a consciência e o sucesso da resistência e empoderamento dos agricultores e da agricultura na construção de uma nova realidade, superando as vontades do mercado e da ciência submissa (PINHEIRO, 2018).

A compostagem é um procedimento que visa acelerar e direcionar o processo de decomposição de materiais orgânicos que ocorre espontaneamente na natureza (BERTON *et al.*, 2021). Com isso, os sólidos biodegradáveis da matéria orgânica são convertidos para um estado estável que pode ser manejado, estocado e utilizado como adubo orgânico sem efeitos nocivos ao ambiente (ORRICO *et al.*, 2007). Ademais, a técnica de inserir rochas moídas na compostagem aumenta a concentração de nutrientes do produto e acelera a solubilização dos minerais, crescendo o potencial nutricional do adubo (ISHIMURA *et al.*, 2006).

Muito embora a compostagem conjunta de pós de rochas e materiais orgânicos possa ser benéfica para o intemperismo biológico dos minerais das rochas e para a qualidade final do produto (ISHIMURA *et al.*, 2006; THEODORO, 2020), a literatura aponta que existem mais estudos tratando a aplicação dos compostos orgânicos e rochas moídas como dois produtos diferentes, ainda que aplicados de forma concomitante (BASAK, *et al.*, 2020; CAMPBELL, 2009; HALLER, 2011; JONES *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2020; O'BRIEN *et al.*, 1999; ROCHA, 2006; TAVARES *et al.* 2018; THEODORO *et al.*, 2012). Percebe-se, com isso, que mais pesquisas são necessárias para determinar quais são os melhores tipos de rochas moídas a serem adicionadas, seu percentual na mistura com o composto orgânico na leira de compostagem e o seu efeito na qualidade do composto (SZMIDT; FERGUSON, 2004).

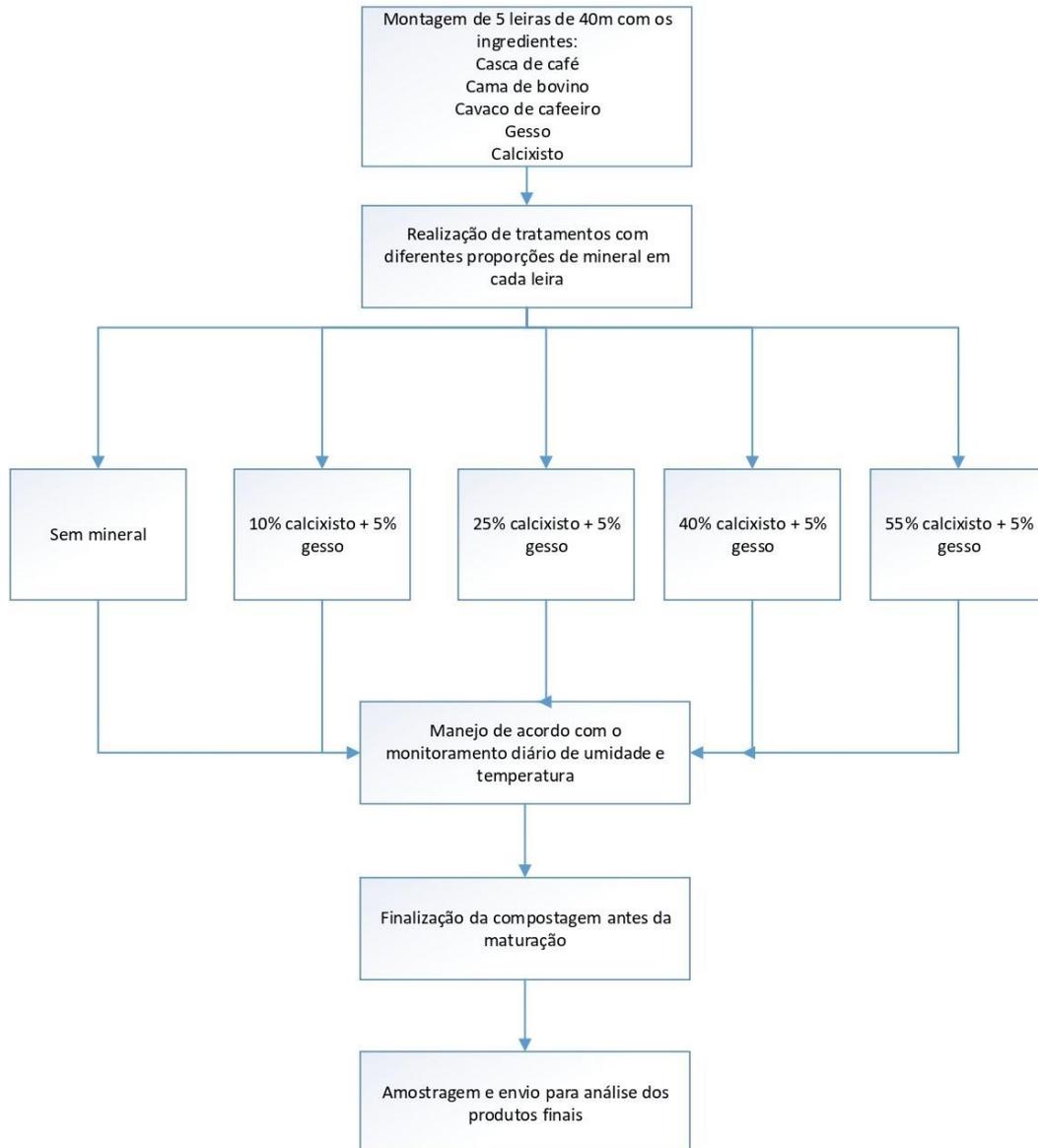
Os fatores operacionais e econômicos geralmente determinam a dose máxima de composto aplicado por hectare, sendo que o uso de pós de rochas implica em uma diminuição da parte orgânica do composto aplicado. Sendo assim, é essencial estudos que

avaliem a qualidade de fertilizantes produzidos em compostagem conjunta de agrominerais silicáticos e resíduos orgânicos. Neste sentido, esse trabalho avaliou cinco tratamentos de compostagem com diferentes proporções de remineralizadores e a qualidade de seus respectivos produtos finais.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado no Noroeste de Minas Gerais, em Unaí, coordenadas 47°17'49,107"W 16°35'42,603"S na Fazenda Ouro Verde, produtora de café. A área situa-se em clima classificado por Köppen como Aw, caracterizado como clima tropical com estação seca no inverno (AYOADE, 2003).

O método adotado na presente pesquisa foi composto pelas etapas mostradas na Figura 3.



**Figura 3 - Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa com diferentes teores de rochas moídas.**

Para montagem das leiras, foram construídos montes com o uso de uma carregadeira com concha de 2 m<sup>3</sup>. Cada tratamento formou uma leira de 40 m, com aproximadamente 1,5 m de altura e 1,8 m de largura. Os ingredientes orgânicos utilizados foram provenientes da fazenda, enquanto, a parte mineral, tem origem regional. Os componentes usados para a produção do composto foram cama de bovino, cavaco de cafeeiro, casca de café, agromineral calcixisto e gesso agrícola (Tabela 5), além de 5% de composto maduro, como inoculante. A cama de bovino foi constituída de casca de café e dejetos de bovinos. A casca de café foi colocada em um confinamento sem cobertura, com espessura média inicial de 10 cm. Os bovinos ficaram por cerca de 90 dias

excretando seus resíduos sobre este material. Todos os materiais foram analisados separadamente em laboratório antes do início do processo compostagem e, considerando a relação C:N de cada uma das matérias primas, obteve-se uma média de relação C:N inicial de 45.

**Tabela 5 - Relação C:N, densidade e teores de nutrientes totais das matérias primas utilizadas na compostagem.**

Parâmetro	LQ	Incerteza	Cama de bovino	Cavaco de cafeeiro	Casca de café	Calcixisto	Gesso agrícola
<b>Relação C:N</b>	-	-	22,8	80	35	-	-
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,1	0,02	0,51	0,4	0,3	1,2	0,9
<b>Umidade (%)</b>	-	-	22	27	30	7	18
<b>Matéria orgânica (%)</b>	3,1	6	53,8	71	64,3	-	-
<b>Carbono orgânico (%)</b>	1,8	1,1	31,23	41,2	37,3	-	-
<b>Nitrogênio (%)</b>	0,5	0,02	1,37	0,52	0,63	-	-
<b>Fósforo (%)</b>	1	0,02	0,48	< 1	< 1	-	-
<b>Potássio (%)</b>	1	0,02	2,91	< 1	1,66	2,2	-
<b>Cálcio (%)</b>	0,5	0,03	2,14	0,67	< 0,5	9,3	19,3
<b>Magnésio (%)</b>	0,05	0,02	0,6	<0,5	<0,5	4,3	-
<b>Enxofre (%)</b>	1	0,784	< 1	< 1	< 1	-	15,6
<b>Silício (%)</b>	0,05	0,3	-	-	-	20,47	-

\*Com exceção do N e Matéria Orgânica, o extrator utilizado para determinação nos resíduos orgânicos e no gesso foi ácido clorídrico. Para o N e Matéria orgânica, foi usado o ácido sulfúrico. No remineralizador, utilizou-se determinação por fluorescência de raios-x.

Legenda: LQ (limite de quantificação).

Para avaliar a influência que os pós de rochas possuem sobre o processo de compostagem e no produto final, foram realizados quatro tratamentos com diferentes

proporções de rochas moídas, além de um tratamento testemunha sem material de origem mineral (Tabela 6).

**Tabela 6 - Tratamentos contendo diferentes proporções de matérias primas para a produção de composto com adição de remineralizador.**

Tratamento	Calcixisto	Gesso	Cama de bovino	Casca de café	Cavaco de cafeeiro
% em massa seca					
T0	0	0	45	20	35
T1	10	5	40	15	30
T2	25	5	35	10	25
T3	40	5	25	10	20
T4	55	5	20	5	15

A compostagem aconteceu entre 14 de agosto e 16 de outubro de 2021. Foram registrados diariamente a temperatura das leiras, a umidade, o cheiro, bem como as atividades realizadas para manutenção da aeração e do umedecimento. A temperatura foi medida com termômetro digital tipo espeto e a umidade do composto foi avaliada pelo tato. A realização da aeração do adubo foi feita com o compostador Jaguar JC 4000 e, a umidificação, com um tanque pipa de 20 mil litros rebocável.

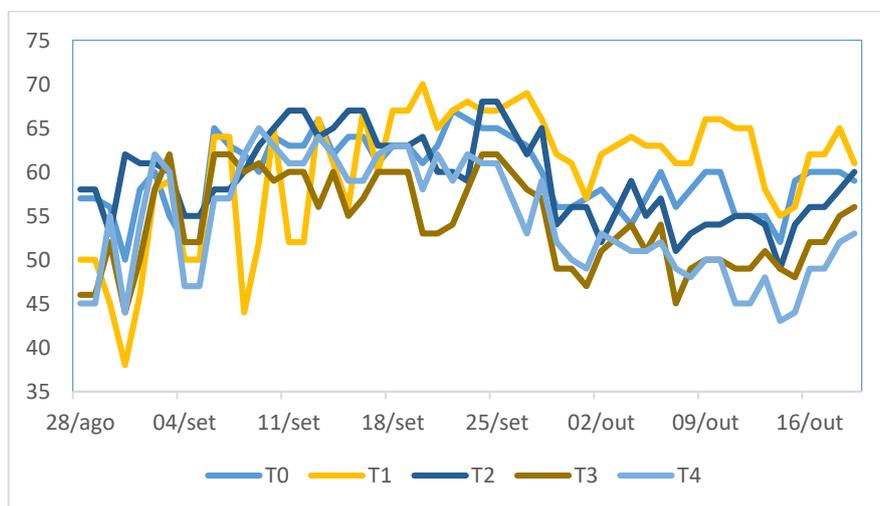
O manejo foi realizado em pátio aberto sobre piso de terra compactado, mantendo as leiras com umidade entre 50 e 60%. Com o composto pronto, foram coletadas subamostras de cada tratamento em diversos pontos da leira, a uma profundidade de 30 cm, totalizando 20 kg de material coletado. Esse material foi misturado para formar uma amostra composta homogênea, da qual uma amostra de 1 kg foi enviada para análise no Laboratório Andrios, onde foram avaliadas características físicas, químicas, orgânicas (GERKE, 2018), sanitárias (uso do kit COLItest®) e biológicas (HÖFIG *et al.*, 2022). Foi realizada uma análise de estatística descritiva para obtenção da concentração média dos materiais (SILVESTRE, 2007).

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Com o percentual correto da parte orgânica e mineral, não se interfere negativamente na atividade microbiana do composto e se possibilita o aproveitamento das temperaturas e os ácidos formados durante o processo de compostagem para propiciar e acelerar reações entre as duas porções. Assim, parte desses minerais ficam disponíveis e ao mesmo tempo protegidos, ligados à parte orgânica, de perdas por volatilização,

lixiviação e adsorção. A presença de calor nas leiras representa a primeira indicação de que o processo de compostagem está se desenvolvendo, e que a matéria prima a ser compostada tem microrganismos que decompõe a matéria orgânica, havendo umidade adequada e oxigênio (CALDEIRA *et al.*, 2012). O monitoramento diário da temperatura das leiras (Figura 4) demonstra que houve o processo de compostagem em todos os tratamentos. Notou-se a ocorrência das fases mesófila e termófila (INÁCIO; MILLER, 2009).

A temperatura de todas as leiras durante o processo de compostagem ficou por, pelo menos, 14 dias maior que 55°C ou três dias maior que 65°C, atendendo o período de tempo e temperatura necessários para higienização dos resíduos sólidos orgânicos determinado pela Resolução nº 481, de 3 de outubro de 2017 (BRASIL, 2017). No entanto, os tratamentos T3 e T4 se mostraram com temperaturas menores que os demais (Figura 4). Mukhtar *et al.* (2004) e Paiva *et al.* (2011) relataram que a temperatura máxima citada em trabalhos apresentados na literatura para material orgânico submetido a compostagem está em torno de 71°C. Nestes estudos, com a temperatura acima de 65°C, a atividade microbiana foi diminuída; já em temperaturas acima de 71°C, foi interrompida.



**Figura 4 - Temperaturas (C°) das pilhas ao longo do tempo.**

Sikora (2004) não encontrou benefícios nas fases iniciais de compostagem e ganhos pequenos e insignificantes de temperatura durante a fase de maturação, em compostagem com o uso de pó de basalto. Em contrapartida, Graham (2001) e Szmidt (2004) constataram aumentos significativos na temperatura da compostagem envolvendo

uma mistura de basalto moído com sedimento fino de origem glacial (*glacial silt*) e carcaças de aves. Garcia-Gomez *et al.* (2002) observaram o aumento dos indicadores de atividade biológica e da temperatura na fase mesofílica com uso de uma mistura de *glacial silt* e quartzo dolerito em compostagem envolvendo cogumelos.

Os tratamentos T3 e T4 apresentaram maior dificuldade no manejo que os T0, T1 e T2. Devido a menor capacidade de absorção e retenção de água nas leiras com menos parte orgânica, os T3 e T4 apresentaram dificuldade para atingir a umidade da leira ideal de 60%. Após ter chegado na umidade pretendida, o material apresentou um ambiente anaeróbico, o que criou cheiro de enxofre, pois os poros das rochas são menores do que os das partículas orgânicas. Esses tratamentos demonstraram ter predominância de uma camada denominada como fria central, com menor atividade biológica devido à falta de oxigênio (KHATOUNIAN, 2001). Com isso, essas leiras demandaram, nas duas primeiras semanas, um manejo mais intenso, necessitando de mais revolvimentos para aeração e exigindo mais potência do trator, devido a maior densidade. Ademais, notou-se que o processo de compostagem desses tratamentos foi mais rápido, já que havia menos matéria orgânica e, portanto, menos alimento para os microrganismos, apresentando menor atividade após o décimo quarto dia.

Já os tratamentos T0, T1 e T2 demandaram um manejo mais simples, uma vez que a água penetrava com mais facilidade no material. Isso fez com a leira chegasse na umidade de 60% mais rapidamente. Além disso, como o produto não compactava com tanta facilidade, o ambiente não ficou predominantemente anaeróbico em nenhum momento e o composto não apresentou cheiro de enxofre, necessitando de menos revolvimento. Notou-se, portanto, diferenças no comportamento da compostagem e no manejo na leira entre os tratamentos T0, T1 e T2 com os tratamentos T3 e T4, sendo, com isso, o limite de 30% de material mineral como divisor de características. Koepf *et al.* (1983) apontaram que é vantajoso ter-se um mínimo entre 5 e 10% de pó de basalto em qualquer composto, mas não mais que 30%. Curtis *et al.* (2023) também encontraram vantagens no uso de 30% de pó de basalto na mistura com cama de frango.

Os tratamentos T1 e T2 apresentaram picos de temperaturas mais altas que o tratamento T0, o que pode indicar que a existência de agrominerais silicáticos estimula a atividade biológica. Tavares *et al.* (2018) constataram que o uso de fonolito como componente inicial na compostagem potencializou a biorrelação de nutrientes da fonte mineral. Lima e Gomes (2011) concluíram que o enriquecimento mineral com pós de rochas de serpentinito e micaxisto favoreceu a atividade biológica e acelerou o processo

de compostagem tanto nos compostos à base de borra de vinhaça quanto naqueles à base de cama de galinha.

No que tange à análise sanitária, todos tratamentos apresentaram ausência de coliformes totais e de germinação de plantas espontâneas. Isso demonstra que a compostagem foi bem realizada e aqueceu até uma temperatura entre 60 a 70° C por um período mínimo e suficiente para eliminar microrganismos patogênicos e sementes viáveis de plantas daninhas (LEPESTEUR, 2021) (Tabela 7). Alguns estudos demonstram que o aumento da temperatura da leira do composto devido à proliferação de microrganismos exotérmicos é essencial na eliminação de transmissores de doenças e de sementes de plantas indesejadas (PEREIRA-NETO, 1998; ZHU, 2007; ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2009; ORRICO-JÚNIOR *et al.*, 2010; HECK *et al.*, 2013). Nesse sentido, diversos trabalhos demonstram que o não aquecimento da leira até a temperatura ideal por alguns dias gera compostos com presença de patógenos (ARAÚJO, 2011; LEITE *et al.*, 2011; CALDEIRA *et al.*, 2012).

Em relação à caracterização química dos compostos, o pH final de todos os adubos foi alcalino, o que é considerado ideal (RODRIGUES *et al.*, 2006), de forma semelhante aos valores encontrados em outros estudos (ABID e SAYADI, 2006; DEON *et al.*, 2007; JAHNEL *et al.*, 1999).

**Tabela 7 - Caracterização química, física, orgânica e biológica dos compostos orgânicos produzidos com os diferentes tratamentos.**

Determinação*	Unidade	Base	Tratamento					
			T0	T1	T2	T3	T4	
pH CaCl <sub>2</sub>		Úmida	8,9	8,3	8,3	8,3	8,2	
Relação C:N			16	13	13	11	10	
Densidade	g.cm <sup>-3</sup>		0,45	0,54	0,55	0,64	0,64	
Umidade			40,55	42,57	35,27	35,13	22,67	
Nitrogênio (N) Total	%	Seca	1,21	1,53	1	0,94	0,78	
Fósforo (P) Total			1,21	0,92	0,83	0,57	0,52	
Potássio (K) Total			2,02	1,62	1,19	0,94	0,8	
Cálcio (Ca) Total			4,66	4,68	7,94	8,8	9,97	
Magnésio (Mg) Total			0,93	1,04	1,85	2,14	2,69	
Enxofre (S) Total			0,4	0,96	0,8	1,2	1,2	
Silício (Si) Total			12	10	13,6	14,8	17,2	
CTC efetiva			mmol.c.kg <sup>-1</sup>	380	380	220	150	140
Matéria orgânica total			%	35,38	34,46	23,27	19,33	14,13
Carbono orgânico				19,76	19,14	12,93	10,74	7,85
Ácido húmico (AH)	g.kg <sup>-1</sup> C orgânico	24,8	7,86	21,64	13,09	14,38		
Ácido fúlvico (AF)		14,96	18,86	15,97	14,79	11,19		
Relação AH:AF		1,66	0,42	1,36	0,89	1,29		
Fosfatase ácida	µg PNG.g <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	Úmida	708	849	818	985	655	
Beta-glicosidase			183	160	189	167	89	
Microrganismos celulolíticos	NMP.g <sup>-1</sup>		2,40E+08	4,62E+07	4,62E+07	7,36E+04	2,40E+08	
Microrganismos diazotróficos			2,31E+02	3,57E+01	9,17E+01	3,57E+01	3,57E+01	
Taxa de germinação P.I. – areia	%		50	50	50	50	50	
Taxa de germinação P.I. – 1%			70	80	60	80	50	
Germinação de plantas espontâneas	Presença ou ausência		-	Ausência				
Coliformes totais			-	Ausência				

pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 M determinação potenciométrica; Densidade (m/v); Umidade 60-65° determinação por umidade; Carbono Orgânico (CO) oxidação dicromato seguido de titulação; Nitrogênio total digestão sulfúrica (Kjeldahl); Fósforo (P205) determinação por espectrofotômetro pelo método com a solução de vanadomolibdica; Potássio (K2O) fotometria de chama; Enxofre (S) gravimétrico de sulfato de bário; Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extração com HCl por espectrofotômetro de absorção atômica; Silício Komdörfer *et al.*, 2004; Relação C:N cálculo; Capacidade de troca de cátions (CTC) (BRASIL, 2017). Matéria Orgânica Total por combustão em Mufla (ALCARDE, 2009.). AH e AF: Benites *et al.*, 2003. Coliformes totais e fecais kit COLtest® realizado conforme as especificações do fabricante. Determinação de presença ou ausência de plantas daninhas por testes de germinação conduzidos em ambiente controlado. Fosfatase ácida e beta-glicosidase: Tabatabai, 1994. Microrganismos: Kasana *et al.*, 2008 e Döbereiner *et al.*, 1995. Taxa de germinação de plantas indicadoras (P.I.) conduzida com experimentos em microcosmos em ambiente controlado utilizando sementes de alfaca. Legenda: PNG (p-nitrofenil-β-D-glicosídeo). NMP (Número mais provável). T0 (Tratamento sem remineralizador). T1 (Tratamento com 10% de remineralizador). T2 (Tratamento com 25% de remineralizador). T3 (Tratamento com 40% de remineralizador). T4 (Tratamento com 55% de remineralizador).

O tratamento T1, com a presença de gesso, foi o material que apresentou maior teor de nitrogênio, já que este produto atenua a perda deste elemento por volatilização

(TUBAIL *et al.*, 2008) e ainda havia 85% de produtos orgânicos, fonte de N, na receita. O T0, com maior teor de materiais orgânicos, apresentou o segundo maior valor de nitrogênio, sendo que nos outros tratamentos o nível deste elemento reduziu com o aumento do teor mineral na mistura inicial do composto. Em relação ao fósforo, como sua fonte principal era o material orgânico, seu percentual diminuiu de acordo com o aumento da quantidade mineral na mistura inicial do composto. Os teores de potássio também reduziram com o aumento do teor mineral na mistura inicial do composto: ainda que o calcixisto apresente esse elemento em sua constituição, a cama de bovino e a casca de café apresentam teores maiores e, por isso, o valor desse elemento no composto produzido reduziu-se à medida que se aumentou o percentual de mineral na mistura inicial do composto, além de parte do K da rocha moída ainda não ter sido disponibilizada.

Já os valores de Ca e Mg aumentaram de acordo com o aumento do teor do remineralizador na mistura inicial do composto, já que estes elementos se encontram em maiores valores no calcixisto, além da existência de cálcio no gesso. Goedert (1989) aponta que a pequena quantidade de cálcio é uma grande limitação dos solos do Cerrado e Scheller (2000) destaca os teores baixos de magnésio nos Latossolos dos trópicos, o que reforça a importância desses nutrientes nos fertilizantes utilizados nessas regiões.

O teor de enxofre no composto final também subiu com o aumento de percentual de rochas moídas na mistura inicial do composto, o que indica que o aumento do teor mineral pode inibir a emissão de gases que contêm esse elemento. Graham (2001) e Szmidt (2004) perceberam a diminuição da presença de amônia e maior retenção de nitrogênio nos compostos produzidos com pó de rocha. No tocante ao silício, seu teor no fertilizante produzido foi crescente do T2 ao T4, pois o teor do agromineral era maior na mistura inicial desses compostos. No entanto, o T0 apresentou teor maior desse elemento do que o T1, ainda que não tenha sido utilizado este remineralizador na mistura inicial no primeiro tratamento. Isso demonstra a existência de silício nos materiais orgânicos que, todavia, não foram considerados nas análises químicas. O silício é um dos elementos que tem tido seu potencial confirmado como redutor da incidência e severidade de doenças em diversas culturas (CARVALHO *et al.*, 2012), estando diretamente ligado à resistência mecânica das plantas e a estrutura anatômica e flexibilidade dos vegetais (RESTREPO; PINHEIRO, 2010). Existem estudos que demonstram sua importância para a eficiência fotossintética (KHAN *et al.*, 2018) e de uso da água (HATTORI *et al.*, 2015).

No que tange à relação C:N, com exceção do tratamento T0, todos tratamentos apresentaram valores menores que 15, o que demonstra a bioestabilização do material

(HAYNES, 1986). Já a relação C:N do T0 é um indicativo de que o material ainda estava compostando quando foi coletado para a análise final e de que o pó de rocha estimula a atividade biológica na compostagem. Jimenez e Garcia (1989) ressaltam, contudo, que, devido às diferenças de materiais em cada compostagem, uma relação C:N entre 20 e 10 não indica necessariamente que o composto já esteja bioestabilizado.

Sobre a CTC efetiva, valores maiores que  $100 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$  são considerados bons (KIEHL, 2004). No presente estudo, o valor da CTC do composto produzido decresceu de acordo com o aumento do teor de remineralizador na receita, acompanhando a queda no teor de matéria orgânica, embora ainda alcançando valores superiores que  $100 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Já as substâncias húmicas possuem relação direta com o grau de maturação do composto. Os ácidos húmicos (AH) e ácidos fúlvicos (AF) são formados pela ação de microorganismos especializados que transformam os restos orgânicos em material humificado. O húmus possui propriedades físico-químicas inteiramente diferentes do material original e a predominância de ácidos húmicos sobre os fúlvicos no final da compostagem é um indicativo de humificação dos resíduos avaliados conforme desejado, já que os ácidos fúlvicos contém elementos facilmente degradáveis (SILVA *et al.*, 2009).

A relação AH:AF é tida como referência para o grau de humificação de compostos orgânicos e, quanto maior ela for, mais humificado é o composto (IGLESIAS-JIMENEZ e PEREZ-GARCIA, 1992; RIFFALDI *et al.*, 1992). Desta forma, nota-se que os tratamentos T0 e T2 foram mais maturados, apresentando valores da relação AH:AF de, respectivamente, 1,66 e 1,36. Ko *et al.* (2008) afirmam que um composto bem humificado deve apresentar relação AH:AF maior que 1,6. Contudo, Bernal *et al.* (1996) constataam que não é possível estabelecer um valor universal para descrever e prever o grau de maturação de compostos de composições distintas. Garcia-Gómez *et al.* (2005) encontram valor da relação AH:AF que variam 0,5 e 2,0 de acordo com o composto avaliado. Já Francou *et al.* (2005) diagnosticaram variações entre 1,2 e 4,3 em diferentes materiais compostados.

Entretanto, considerando o efeito, em clima tropical, da matéria orgânica não decomposta na melhora da atividade biológica e estrutura do solo (PRIMAVESI, 2021), em alguns locais no Brasil, tem-se terminado o manejo da compostagem antes da fase de maturação, para que essa fase ocorra na lavoura, sendo entendido o valor da relação AH:AF próximo de 1 como indicado para solos de clima tropical. Magalhães *et al.* (2021), por exemplo, consideraram o composto feito com resíduos da agroindústria do palmito

pronto com 45 dias, assim como Höfig *et al.* (2022), visando, por exemplo, maior rendimento do composto em toneladas de matéria seca e menores perdas de N e C.

Neste sentido, a análise biológica mensura sua atividade e os processos derivados dela, como a ciclagem de nutrientes e a formação e decomposição da matéria orgânica do solo (MENDES *et al.*, 2021). Os resultados biológicos mostraram que os compostos apresentam característica de um inoculante, isto é, contém microrganismos com atuação favorável ao crescimento das plantas (Tabela 3). Os microrganismos diazotróficos de vida livre são fixadores de nitrogênio atmosférico (SOUSA *et al.*, 2020). A fixação desse nutriente por organismos especializados se dá principalmente quando o composto está curado, quase seco e não contém nitrogênio amoniacal (COTTA *et al.*, 2015). Já os microrganismos celulolíticos, que estão vinculados ao ciclo do carbono, decomposição da matéria orgânica e disponibilização de nutrientes (CERRI *et al.*, 1992), também explicam a diminuição no teor de matéria orgânica dos fertilizantes finais em relação aos valores dos materiais iniciais.

Notou-se, ainda, um estímulo dos microrganismos celulolíticos com aumento do percentual de rochas moídas, até o tratamento T3 e, para os diazotróficos, em todos tratamentos, com destaque para o T2. É natural que os minerais estimulem a atividade biológica, pois o pó de rocha serve como alimento para os fungos e bactérias (UROZ *et al.*, 2015). Esse é um processo natural de intemperismo biológico para formação dos solos, um mecanismo que a natureza utiliza ao longo do processo de transformação das rochas em solos (THEODORO, 2020).

Em relação às enzimas, a funcionalidade destes grupos microbianos afeta diretamente a qualidade e a fertilidade do solo e contribui para o funcionamento dos ecossistemas (BROOKES, 1995). A presença da  $\beta$ -glicosidade, indicadora de qualidade biológica do solo (PAZUTTI e CHAER, 2012) e relacionada com a ciclagem de carbono (PINHEIRO, 2011), também afetou na decomposição da matéria orgânica dos compostos, ainda que no tratamento T4 tenha se notado queda acentuada no valor desta enzima (Tabela 7). Já a presença da enzima fosfatase ácida, associada ao ciclo do fósforo e reveladora da alta atividade de microrganismos solubilizadores de fósforo (DICK e TABATABAI, 1993), explica o aumento percentual no teor de fósforo dos produtos finais em relação às matérias primas. Höfig *et al.* (2022), em estudo de compostagem com materiais semelhantes ao deste estudo e com teor de remineralizador próximo ao do tratamento T2, apresentou valores mais altos de  $\beta$ -glicosidase. Para a fosfatase ácida, apenas o T3 alcançou números maiores (Tabela 7).

A avaliação de germinação realizada com sementes de plantas indicadoras mostrou que todos os testes que receberam compostos não apresentaram fitotoxidez. Estudos apontam que o material é considerado fitotóxico quando o índice de germinação é menor do que 80% em relação ao controle (ARSAND *et al.*, 2022). Da mesma forma, Aquino (2003) também não encontrou fitotoxidez em teste de germinação com material oriundo de compostagem de resíduos domésticos, assim como Höfig *et al.* (2022).

#### **4 CONCLUSÕES**

Ocorreu uma compostagem eficiente em todos tratamentos, demonstrado pela caracterização da fase termofílica e pela ausência de coliformes totais e de germinação de plantas espontâneas reveladas na análise sanitária.

O monitoramento da temperatura das pilhas indicou que o uso de rochas moídas, não ultrapassando 30% do peso seco total da receita, estimula a atividade biológica da compostagem.

A condução da compostagem e o manejo das pilhas foi dificultado com o percentual de pó de rocha maior que 30% da receita.

Os fertilizantes produzidos não apresentaram características fitotóxicas para as plantas.

Os dados sugerem que o uso do remineralizador calcixisto e do gesso na compostagem aumentaram a retenção de nitrogênio no produto final.

## **CAPÍTULO III – DIFERENTES ROCHAS MOÍDAS NA COMPOSTAGEM EM UNAÍ/MG: FERTILIZANTE ORGÂNICO E AUTONOMIA AGRÍCOLA<sup>3</sup>**

**Different crushed rocks in the composting process in Unaí/MG: organic fertilizer and agricultural autonomy**

**Diferentes rocas trituradas en el proceso de compostaje en Unaí/MG: abono orgánico y autonomía agrícola**

### **RESUMO**

A segurança alimentar da população não pode ser garantida apenas com o uso de fertilizantes sintéticos e solúveis em água. Este estudo avaliou o processo e o produto final da compostagem conjunta de resíduos orgânicos com rochas moídas como remineralizadores, utilizando calcixisto, micaxisto e fonolito. O composto foi produzido a partir de cama de bovino, silagem de milho, casca de café e gesso agrícola. A compostagem foi eficiente em todos os tratamentos, com a fase termofílica caracterizada e ausência de coliformes totais e germinação de plantas espontâneas no produto final. O tratamento com micaxisto apresentou a menor diminuição relativa de potássio entre as matérias-primas originais e o produto final, indicando uma melhor relação entre custo e benefício.

**Palavras-chave:** agrominerais; autossuficiência; agricultura sustentável.

### **ABSTRACT**

It is widely recognized that food security for the population cannot be guaranteed by the use of synthetic and water-soluble fertilizers alone. This study aimed to evaluate the process and final product of co-composting organic residues with ground rocks as remineralizers, using calcareous shale, mica schist, and phonolite. Other components used in the compost production were cattle bedding, silage, coffee husk, and agricultural gypsum. Efficient composting occurred in all treatments, as demonstrated by the characterization of the thermophilic phase, absence of total coliforms, and spontaneous plant germination. The mica schist treatment produced the compost with the lowest relative decrease in potassium between the original raw materials and the final product, indicating a more favorable cost-benefit ratio.

**Key words:** agrominerals; self-sufficiency; sustainable agriculture

---

<sup>3</sup> Trabalho publicado na revista *Geographia Opportuno Tempore*, v. 9, n. 1, 2023.

## RESUMEN

Ya se sabe que no es posible garantizar la seguridad alimentaria de la población solo con el uso de fertilizantes sintéticos e hidrosolubles. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el proceso y el producto final del compostaje conjunto de residuos orgánicos con rocas trituradas como remineralizadores, cada tratamiento con un tipo diferente: calcoesquistos, mica-esquistos y fonolita. Los componentes utilizados para la elaboración de la composta fueron yacija bovina, ensilaje, cascarilla de café, yeso agrícola y remineralizadores. Hubo un compostaje eficiente en todos los tratamientos, demostrado por la caracterización de la fase termófila y ausencia de coliformes totales y germinación de plantas espontáneas. El tratamiento con mica-esquistos mostró la menor disminución relativa de potasio entre las materias primas originales y el producto final, lo que generalmente define la mejor relación costo-beneficio.

**Palabras clave:** agrominerales; autosuficiencia; agricultura sostenible.

## 1 INTRODUÇÃO

Já se tem o conhecimento de que não é possível garantir a segurança alimentar para a população apenas com o uso de fertilizantes sintéticos e solúveis em água (INYINBOR *et al.*, 2019). Para adquirir tais produtos de fontes finitas (GLIESMANN, 2000; WISTINGHAUSEN *et al.*, 2000) e que apresentam desvantagens em seu comportamento relacionados ao clima tropical e às características intrínsecas ao solo situado nesse clima (LEONARDOS *et al.*, 2000), o produtor rural usualmente se depara com setores comerciais e produtivos concentrados ou oligopolizados (PERES *et al.*, 2010), transformando-se em um consumidor dependente de insumos agrícolas e serviços técnicos. O desrespeito à regionalidade é um dos problemas que a humanidade tem que combater no que se refere à agricultura e à alimentação. Ao mesmo tempo, a agricultura orgânica, prática ancestral, “evoluiu” para um estranho sistema em que se compram coisas caras e vindas de longe, ao invés de se usar o que é mais barato e está mais próximo (CHO, 2018).

Contudo, movimentos de agricultura alternativos ao convencional, contrapondo-se ao uso abusivo de insumos agrícolas globalizados, da dissipação do conhecimento tradicional e da deterioração da base social de produção de alimentos, têm tido um reconhecimento cada vez maior (ASSIS; ROMEIRO, 2002). A busca por uma agricultura rentável e permanente passa pela valorização das fontes de nutrientes disponíveis regionalmente, o que fornece mais autonomia para o setor rural no tocante à fertilização das culturas. A possibilidade de se mobilizar tais recursos, adequados para condições

tropicais e para solos com baixa capacidade de retenção de cátions, é uma premissa para construção de um novo modelo de desenvolvimento rural (FEIDEN, 2001).

A compostagem, técnica ancestral (KOEPPF *et al.* 1983), e a aplicação de rochas moídas como remineralizadores de solo, prática utilizada desde o fim do século XIX (HENSEL, 1898), refletem a ideia de uma agricultura baseada nos ciclos naturais. A aplicação de remineralizadores acelera um processo de rejuvenescimento dos solos que acontece naturalmente por meio de erupções vulcânicas, movimentos glaciares e depósitos aluvionares (THEODORO, 2020). A compostagem é um procedimento que estimula e direciona o processo de decomposição de materiais orgânicos que ocorre espontaneamente na natureza, mas que, com maior influência das variações dos fatores ambientais, tem sua estabilização protelada (BERTON *et al.*, 2021).

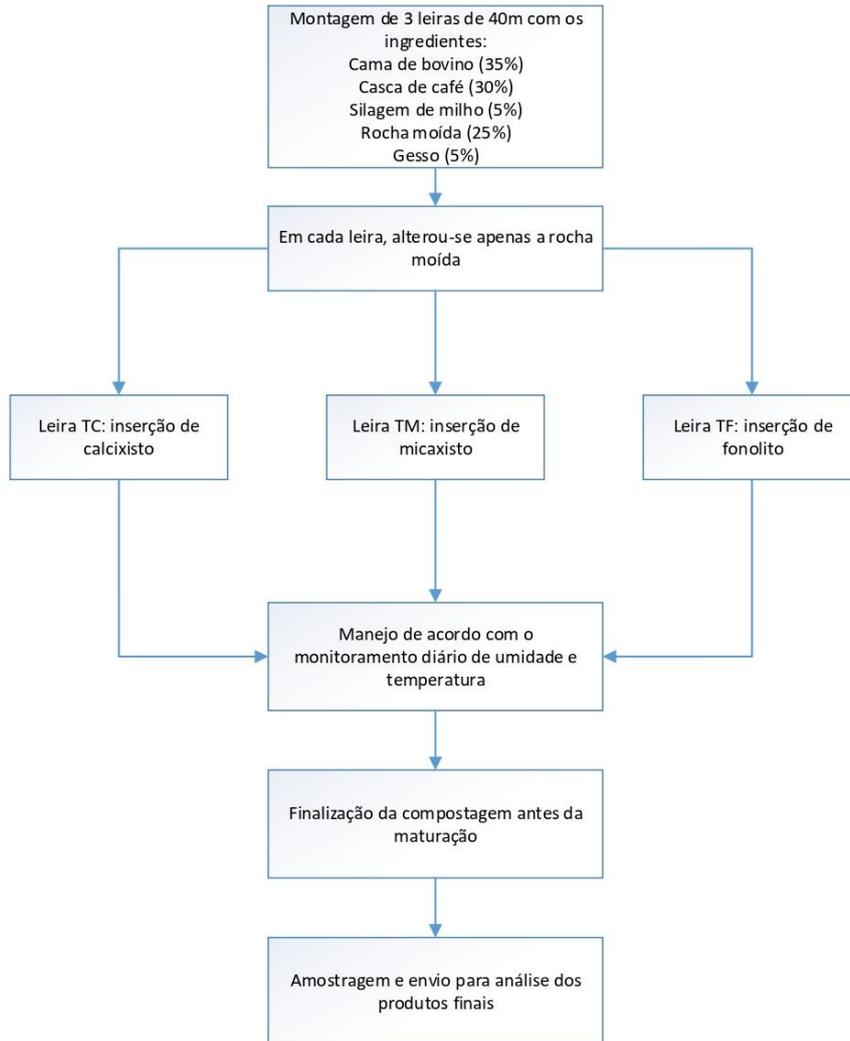
Em muitos casos, rochas silicáticas moídas são misturadas a compostos orgânicos e a liberação dos nutrientes pode ser estimulada por meio de mecanismos físico-biológicos controlados (THEODORO, 2020). Adicionar rochas moídas ao processo de compostagem é uma forma de beneficiamento biológico do produto e, ao mesmo tempo, de aumento de atividade biológica da compostagem. Os microrganismos presentes no composto aceleram, por meio dos ácidos húmicos, a quebra dos compostos químicos presentes, especialmente nos argilominerais, liberando, dessa forma, uma maior porcentagem de nutrientes para as plantas (PINHEIRO, 2021). Ao mesmo tempo, os minerais estimulam a atividade biológica, pois são alimentos para os fungos e bactérias (UROZ *et al.*, 2015). Além disso, é de extrema importância a criação de um vínculo pessoal com o adubo, especialmente com o seu processo de produção (STEINER, 1977, 2017). O homem é dotado de capacidades que quer exercitar. Ele é um ser de participação e criação que quer ser o sujeito de sua história (BOFF, 1995).

Neste sentido, é essencial testar fertilizantes produzidos com a compostagem conjunta de rochas moídas e resíduos orgânicos. Este trabalho objetiva avaliar o processo e o produto final da compostagem conjunta de resíduos orgânicos com três diferentes rochas moídas.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido na Fazenda Ouro Verde, zona rural de Unaí/MG conhecida como Chapada, mesorregião Noroeste de Minas Gerais, próximo ao Distrito Federal (IBGE, 2019), bioma Cerrado (IBGE, 2012). A área situa-se em clima tropical com estação seca no inverno, classificado por Köppen como Aw (AYOADE, 2003). A altitude média é de 870 metros, com predominância de relevo suave ondulado (declividade entre 3 a 8%) (RAMALHO-FILHO; BEEK, 1995). As classes de solos predominantes são Latossolo Vermelho, Latossolo Amarelo e Plintossolo Pétrico (HÖFIG; GIASSON, 2015).

O método na presente pesquisa foi composto pelas etapas mostradas na Figura 5.



**Figura 5 - Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa com diferentes rochas moídas.**

Foram realizados três tratamentos de compostagem, dos quais diferenciaram-se entre si apenas os agrominerais silicáticos, sendo eles calcixisto, micaxisto e fonolito. Os demais componentes utilizados para a produção do composto foram cama de bovino, silagem de milho, casca de café e gesso agrícola (Tabela 8). Como inoculante foi utilizada a Solução de Microrganismos JADAM (CHO, 2018). A cama de bovino foi constituída de capim napier triturado e dejetos de bovinos, produtos disponíveis dentro da fazenda. Considerou-se 5 kg de cama seca por dia de confinamento por animal, visando à retenção total de seus excrementos (KHATOUNIAN, 2001). Os bovinos ficaram por 90 dias expelindo seus resíduos sobre este material.

As leiras de composto possuíam 40 metros de comprimento, 1,5 metros de altura e largura de 1,8 metros. Nestas foram misturados 1.411 kg de cama de bovino/m de leira,

1.347 kg de casca de café por metro de leira, 218 kg de silagem de milho/m de leira, 166 kg de gesso/m de leira e 735 kg de rocha moída/m de leira.

**Tabela 8 - Materiais utilizados nos tratamentos de compostagem e suas participações percentuais no composto com base no peso seco.**

<b>Tratamento 1</b>		<b>Tratamento 2</b>		<b>Tratamento 3</b>	
<b>Material</b>	<b>Percentual no composto</b>	<b>Material</b>	<b>Percentual no composto</b>	<b>Material</b>	<b>Percentual no composto</b>
Cama de bovino	35	Cama de bovino	35	Cama de bovino	35
Casca de café	30	Casca de café	30	Casca de café	30
Silagem de milho	5	Silagem de milho	5	Silagem de milho	5
Gesso	5	Gesso	5	Gesso	5
Calcixisto	25	Micaxisto	25	Fonolito	25

O calcixisto é um agromineral silicático do Grupo Canastra, extraído em Luziânia, Goiás, registrado no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como remineralizador de solos com número GO-09345.10001-1. Este material apresenta soma total de bases na forma de óxidos (CaO + MgO + K<sub>2</sub>O) em torno de 23 %, e 2,7% de K<sub>2</sub>O, 44% de SiO<sub>2</sub>, 7,5% de MgO e 13,5% de CaO. A mineralogia é composta por 40% de carbonatos e 60% de silicatos, principalmente muscovita, biotita, clorita e quartzo. A granulometria apresenta mais que 80% passante na peneira de 0,3 mm.

O micaxisto é um agromineral silicático do Grupo Araxá (KRAHL *et al.*, 2022) e, por ter mais de 25% de quartzo em sua composição, tem autorização de comercialização pelo MAPA como material secundário, sob número GO-00664, com garantia de composição mínima de 4% de K<sub>2</sub>O, 57% de SiO<sub>2</sub>, 3,7% de MgO e 1,1% de CaO. A mineralogia do material aponta cerca de 26% de muscovita, 15% de oligoclásio, 12% de biotita, 11% de clorita clinocloro, 1,76% de albita, 0,88% de microclínio, 0,8% de ilmenita e 0,64% de magnetita. A granulometria apresenta mais que 80% passante na peneira de 0,3 mm.

O fonolito é um agromineral silicático derivado de uma rocha alcalina de origem vulcânica do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (TEIXEIRA *et. al.* 2011). A

mineralogia do produto utilizado aponta a predominância de microclínio e muscovita, com traços de caulinita e gibbsita, e 11,3% de  $K_2O$  e 19,9% de Si. O material está registrado no MAPA como fertilizante mineral simples, sob o N°.: MG 001151-7.00002. A granulometria apresenta 55,7% passante na peneira de 0,3 mm.

Todos as matérias primas foram analisadas separadamente em laboratório antes do início do processo de compostagem e, considerando a proporção de cada um no produto, encontrou-se a relação C:N inicial de 40 do conjunto de materiais a serem compostados (Tabela 9). Foram registradas diariamente as temperaturas das leiras, a umidade e o cheiro, bem como as atividades realizadas para manutenção da aeração e do umedecimento. A temperatura foi medida em três pontos de cada leira com termômetro digital tipo espeto, a uma profundidade de 30 cm a mais ou menos 1 metro de altura do solo, e a umidade do composto foi avaliada pelo o tato (PENTEADO, 2010).

**Tabela 9 - Relação C:N, densidade e teores de nutrientes totais das matérias primas utilizadas na compostagem.**

Parâmetro*	LQ	Incerteza	Cama de bovino	Silagem de milho	Casca de café	Calci-xisto	Mica-xisto	Fono-lito	Gesso
Relação C:N	-	-	22,2	21,71	51,5	-	-	-	-
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,1	0,02	0,5	0,4	0,3	1,2	1,1	1,1	0,9
Umidade a 65°C (%)	1	0,2	23,2	11,5	6,9	7	6	5	18
Matéria orgânica (%)	3,1	5,7	69,8	56,9	71,9	-	-	-	-
Carbono orgânico (%)	1	1,8	40,5	33	41,7	-	-	-	-
Nitrogênio (%)	0,05	0,5	1,8	1,52	0,81	-	-	-	-
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %)	1	-	< 1	< 1	< 1	-	-	-	-
Potássio (K <sub>2</sub> O %)	1	0	2,0	1,49	3,0	2,7	4,0	11,3	-
Cálcio (CaO %)	0,5	0,01	2,9	1,16	< 0,5	13,5	1,1	-	27,04
Magnésio (MgO %)	0,5	0,03	0,4	< 0,5	< 0,5	7,5	3,7	-	
Enxofre (S) (%)	1	-	< 1	< 1	< 1	-	-		15,6
Silício (Si) (%)	0,05	0,3	-	-	-	20,5	29,6	19,9	-

\*Com exceção do N e matéria orgânica, o extrator utilizado para determinação nos resíduos orgânicos e no gesso foi ácido clorídrico. Para o N e matéria orgânica, foi usado o ácido sulfúrico. Nas rochas moídas, utilizou-se determinação por fluorescência de raio-x.

Legenda: LQ (limite de quantificação).

A realização da aeração foi feita com o compostador Jaguar JC 4000 e a umidificação foi realizada com um tanque pipa de 20 mil litros rebocável (Figura 6). Materiais com menos de 30% de umidade inibem a atividade microbiana, e, acima de 65%, proporciona decomposição predominantemente anaeróbica e lixiviação de nutrientes (RICI; NEVES, 2004). Já a aeração corrige o excesso de umidade, aumenta a velocidade de oxidação e diminui a liberação de odores (SOARES *et al.*, 2017).



**Figura 6 - Revolvimento e umidificação das leiras de compostagem**

O manejo foi realizado em pátio aberto sobre piso de terra compactada, mantendo-se a umidade do material entre 50 e 60% até a fase de maturação. O processo de compostagem de todos os tratamentos durou 55 dias, tendo início no dia 23 de julho e término no dia 16 de setembro de 2022, antes de alcançar a fase de maturação.

Foram coletadas três amostras compostas para cada tratamento, enviadas para análise no Laboratório Andrios, credenciado pelo MAPA, onde foram avaliadas características físicas, químicas, orgânicas (GERKE, 2018), sanitárias (uso do kit COLItest®) e biológicas (HÖFIG *et al.*, 2022). Para os valores finais disponíveis, calculou-se a média das três amostras de cada tratamento, bem como seu desvio padrão. A verificação dos pressupostos da Análise de Variância (ANOVA) consistiu nos testes de normalidade, homogeneidade e análise de resíduos. Uma vez atendidos, foi conduzida a ANOVA e o teste de comparação de médias. Quando os pressupostos não eram satisfeitos, foi feita a transformação de dados, com re-avaliação dos pressupostos, e ANOVA de dados transformados. Se mesmo com a transformação de dados, os pressupostos ainda não eram satisfeitos, procedeu-se a análise não paramétrica. Todos os testes foram feitos para um nível de significância de 5%.

Também foi contabilizado o aproveitamento dos elementos em cada tratamento, considerando-se o teor total inicial do nutriente e o teor disponível do nutriente ao final da compostagem, levando em consideração a redução da massa total da leira. Os valores iniciais foram normalizados para quantidade de matéria orgânica utilizada.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presença de calor nas leiras representa a primeira indicação de que o processo de compostagem está se desenvolvendo, e que a matéria prima a ser compostada tem microrganismos que decompõe a matéria orgânica, havendo umidade adequada e oxigênio (CALDEIRA *et al.*, 2012). Todos os tratamentos se apresentaram com temperaturas acima de 55°C por mais de 14 dias, o que demonstra que ocorreu a fase termofílica da compostagem (Figura 7). Com isso, todos os compostos exibiram ausência de coliformes totais e de germinação de plantas espontâneas (Tabela 10). Ademais, eles demonstraram características que não causam nenhum efeito prejudicial ao desenvolvimento das plantas, visto que, conforme testes de germinação conduzido em casa de vegetação, a avaliação realizada com sementes de plantas indicadoras mostrou que os ensaios que receberam composto obtiveram taxa de germinação maior do que no teste com apenas areia e maior também que o parâmetro de qualidade de 80% de taxa de germinação (BUCHANAN *et al.*, 2001). Tiquia e Tan (1998) apontam que o material é considerado fitotóxico quando o índice de germinação é menor do que 80% em relação ao controle.

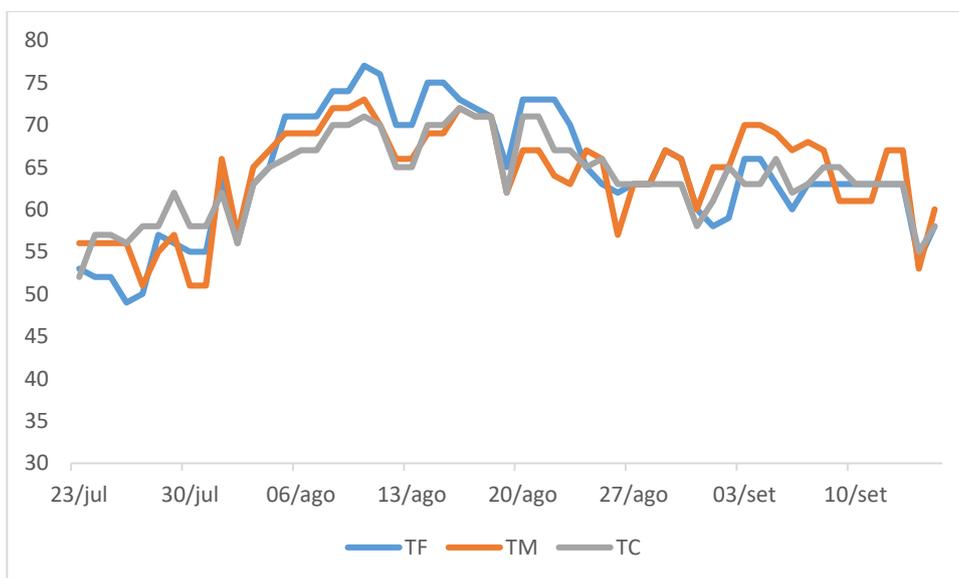


Figura 7 - Temperaturas das leiras ao longo do tempo (°C). Legenda: TF (fonolito); TM (micaxisto); TC (calcixisto).

No TF, entretanto, foi mais difícil se manter a umidade ideal, exigindo molhamentos e revolvimentos mais frequente, sendo 11 e 25, respectivamente, enquanto nos TM e TC, foram 9 e 23. Por essa razão, o TF apresentou períodos com a temperatura muito alta (Figura 7). O calcixisto e o micaxisto possuem argilominerais expansivos, o

que aumenta a capacidade de retenção de água, diferente do fonolito, o que fez com que sua leira demandasse manejo mais frequente. Nenhum tratamento, contudo, gerou odores, que são causados principalmente pela decomposição anaeróbia dos materiais orgânicos devido a bolsões nos quais o oxigênio não consegue penetrar, originados por excesso de umidade ou por maior compactação do composto (BERTON *et al.*, 2021).

A qualidade de um composto tem relação com o teor de nutrientes, relação C:N, umidade, teor de matéria orgânica, granulometria, grau de humificação e contaminação. Ressalta-se, todavia, que determinar padrões de qualidade para produtos orgânicos pode ser uma tarefa difícil, por causa da heterogeneidade de subprodutos agregados (KATTOOF *et al.*, 2019).

**Tabela 10 - Característica químicas, físicas, biológicas e sanitárias do composto de cada tratamento.**

Determinação*	Análise		Média TF	DP TF	Média TM	DP TM	Média TC	DP TC	
pH CaCl2	Química/física	-	7,17b	0,21	7,2b	0	7,73a	0,05	
Relação C:N		-	14,00ab	0,82	14a	0	13b	0,00	
Densidade		g.cm <sup>-3</sup>	0,77sn	0,03	0,70sn	0,02	0,73sn	0,03	
Umidade		%		25,15b	0,42	28,49a	0,46	23,97b	0,52
N				1,18a	0,02	1,27a	0,05	0,98b	0,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				0,74ns	0,03	0,75ns	0,04	0,74ns	0,00
K <sub>2</sub> O				1,92a	0,17	1,77a	0,01	1,48b	0,09
Ca				2,65b	0,29	2,73b	0,14	5,25a	0,31
Mg				0,34c	0,24	0,86b	0,03	1,80a	0,12
S				0,62b	0,03	0,64b	0,02	0,71a	0,01
Si				10,47ns	0,77	10,6ns	1,56	10,87ns	1,79
CTC efetiva		mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		443,3ab	24,94	456,7a	18,86	363,3b	41,10
Matéria orgânica total		Orgânica	%	29,65a	1,56	31,09a	1,41	23,40b	0,65
Carbono orgânico	16,47a			0,86	17,27a	0,79	13b	0,36	
Ácido húmico (AH)	g.kg <sup>-1</sup> C orgânico		10,71ns	1,22	8,36ns	0,67	9,92ns	0,86	
Ácido fúlvico (AF)			7,58ns	1,14	6,46ns	0,94	8,45ns	0,92	
Relação AH:AF	-			1,42b	0,05	1,31ab	0,09	1,18a	0,05
Fosfatase ácida	Biológica	μg PNF.g <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	655,3ns	58,9	734,6ns	177,0	779,7ns	128,9	
β- glicosidase		μg PNG.g <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	146,0ns	3,7	162,6ns	21,7	169,0ns	15,6	
Microrganismos celulolíticos		NMP.g <sup>-1</sup>	4,71E+07a	32.621.192	9,54E+06ab	10.224.764	2,99E+06b	1.811.607	
Microrganismos diazotróficos			7,96E+01ns	8,53	5,44E+01ns	26,40	5,44E+01ns	26,40	
Taxa de germinação P.I. – areia		%		80	0,00	80	0,00	80	0,00
Taxa de germinação P.I. – 1%				90	0,00	83,33	9,43	86,67	4,71
Germinação plantas espontâneas	Sanitária	Presença ou ausência	Ausência						
Coliformes totais									

Legenda tabela 10: pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 M determinação potenciometria; Densidade (m/v); Umidade 60-65° determinação por umidade; Carbono Orgânico (CO) oxidação dicromato seguido de titulação; Nitrogênio total digestão sulfúrica (Kjeldahl); Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) determinação por espectrofotômetro pelo método com a solução de vanadomolibdica; Potássio (K<sub>2</sub>O) fotometria de chama; Enxofre (S) gravimétrico de sulfato de bário; Silício Korndörfer *et al.*, 2004; Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extração com HCl por espectrofotômetro de absorção atômica; Relação C:N cálculo; Capacidade de troca de cátions (CTC) (BRASIL, 2017). Matéria Orgânica Total por combustão em Mufla (ALCARDE, 2009). AH e AF: Benites *et al.*, 2003. Coliformes totais e fecais kit COLItest® realizado conforme as especificações do fabricante. Determinação de presença ou ausência de plantas daninhas por testes de germinação conduzidos em ambiente controlado. Fosfatase ácida e beta-glicosidase: Tabatabai, 1994. Microrganismos: Kasana *et al.*, 2008 e Döbereiner *et al.*, 1995. Taxa de germinação de plantas indicadoras conduzida com experimentos em microcosmos em ambiente controlado utilizando sementes de alface.

Legenda: PNF (Paranitrofenil fosfato). PNG (p-nitrofenil-β-D-glicosídeo). NMP (número mais provável). TF (tratamento com fonolito); TM (tratamento com micaxisto); TC (tratamento com calcixisto); DP (desvio padrão); P.I (planta indicadora). ns (não significativo para o teste a 5% de nível de significância; a (maior média); b (média menor que “a”); ab (média intermediária entre “a” e “b”); c (menor média).

A presença de 42,8% de carbonatos reativos fez o tratamento com calcixisto (TC) possuir os maiores teores de cálcio e magnésio, o que demonstra o alto potencial corretivo deste remineralizador e do composto TC. Em contrapartida, os menores valores de K<sub>2</sub>O neste pó de rocha (2,7%) originou um composto com os menores teores deste elemento dentre os tratamentos. Os tratamentos com fonolito (TF) e micaxisto (TM) apresentaram os maiores teores de K<sub>2</sub>O.

Apesar das diferentes proporções de silício no fonolito, micaxisto e calcixisto, os teores de silício nos compostos finais, em torno de 10%, não apresentam diferenças estatísticas entre os tratamentos (Tabela 10). O silício é um dos elementos que tem seu potencial confirmado como redutor da incidência e severidade de doenças em diversas culturas, estando diretamente ligado à resistência mecânica das plantas e a estrutura esquelética e flexibilidade dos vegetais (SANTOS *et al.* 2021). Já os teores de fósforo foram iguais em todos os tratamentos, o que demonstra que este nutriente advém exclusivamente da parte orgânica do composto.

No tocante à enzima β-glicosidase, indicadora de qualidade biológica do solo (MENDES *et al.* 2021) e relacionada com a ciclagem de matéria orgânica, especialmente celulose (PINHEIRO, 2021), os resultados foram menores, em todos tratamentos, que o encontrado por Höfig *et al.* (2022). Da mesma forma, em todos os testes os valores da enzima fosfatase ácida, associada ao ciclo do fósforo e reveladora da alta atividade de microrganismos mineralizadores de fósforo (ZAGO *et al.* 2020), também foram menores que o encontrado por Höfig *et al.* (2022). Os tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas para essas enzimas.

Pinheiro (2021) afirma que tais enzimas são indicadores de saúde do solo e são produtos de altíssima rentabilidade comercial para as empresas de biotecnologia. Melo (2007) constatou que, de um modo geral, o uso do lodo de esgoto compostado aumentou a atividade enzimática do solo. Vinhal-Freitas *et al.* (2010) analisaram a atividade enzimática e microbiana em solo tratado com composto orgânico oriundo de resíduos

domésticos e relataram que as enzimas  $\beta$ -glicosidase e a fosfatase ácida foram fortemente influenciadas pela adição do adubo, aumentando significativamente, assim como a atividade microbiana.

Esse conjunto de inoculantes, juntamente com substâncias orgânicas complexas, altera para melhor a eficiência de absorção dos elementos minerais no solo, na medida em que favorecem sua ativação biológica. A fosfatase é essencial para disponibilizar o fósforo presente nos solos sob clima tropical, pois, em solos altamente intemperizados, grande parte do fósforo é imobilizada no solo em virtude de reações de precipitação, adsorção e fixação em coloides minerais (VINHA *et al.*, 2021). A enzima  $\beta$ -glicosidase atua na etapa final do processo de decomposição da celulose e é responsável pela hidrólise dos resíduos de celobiose, um dissacarídeo de rápida decomposição no solo, liberando como produto a glicose, que atua como importante fonte de energia para os microrganismos (ZAGO *et al.*, 2018), que, de forma simbiótica, secretam enzimas (BOROWIK; WYSZKOWSKA, 2016).

Em relação aos microrganismos, o TF revelou os maiores números para os celulolíticos, que são vinculados ao ciclo do carbono, decomposição da matéria orgânica, principalmente fibra, e equilíbrio de nutrientes por meio da decomposição da celulose (YANG *et al.*, 2014). Já os diazotróficos são fixadores de nitrogênio atmosférico (SOUSA *et al.*, 2020). Para este, contudo, não houve diferença entre os tratamentos para o teste a 5% de nível de significância. Cho (2018) ressalta, porém, que mais de 99% dos microrganismos do solo são desconhecidos por nós, sendo que seus benefícios estão em sua diversidade e suas características autóctones. O autor não recomenda a seleção de microrganismos. Em contrapartida, Leal *et al.* (2021) apontam que as bactérias fixadoras de nitrogênio são consideradas como um dos grupos de maior importância na agricultura tropical.

Na Tabela 11 estão expostos alguns parâmetros de qualidade. Em todas situações foram atingidos os índices de qualidade da CTC efetiva, pH  $\text{CaCl}_2$ , relação C:N, umidade, teor de nitrogênio, índice de germinação de sementes e temperatura.

Em todos os tratamentos a CTC se mostrou com valores bem acima do parâmetro de qualidade. Isso está ligado aos teores de carbono orgânico, mas também pode estar relacionado aos minerais silicáticos secundários formados pelo intemperismo dos minerais primários dos pós de rochas utilizados (MARTINS *et al.*, 2010). Nota-se uma queda considerável da CTC no TC, provavelmente relacionada com os menores teores de carbono orgânico e matéria orgânica oriundos da mineralização mais intensa promovida

pelos carbonatos do calcixisto. Ramos *et al.* (2018) apontam a importância da matéria orgânica para a CTC.

**Tabela 11 - Padrão de referência de qualidade dos atributos do composto.**

Dentro do padrão de referência?			Parâmetro de qualidade	Padrão de referência	Fonte
TC	TM	TF			
N	N	N	Relação AH:AF	> 1,6	Ko <i>et al.</i> , 2008
S	S	S	Índice de germinação de sementes	> 80%	Buchanan <i>et al.</i> , 2001
S	S	S	CTC efetiva	> 100 mmol <sub>c</sub> /kg	Kiehl, 2004
S	S	S	pH CaCl <sub>2</sub>	> 5,5	MAPA, 2005
S	S	S	Teor de Nitrogênio	> 0,5%	
S	S	S	Umidade	< 50%	MAPA, 2020
N	S	S	Carbono Orgânico	>15%	
S	S	S	Relação C:N	< 20	
S	S	S	Temperatura	14 dias > 55°C ou 3 dias > 65°C	Brasil, 2017

Legenda: TC (tratamento com calcixisto); TM (tratamento com micaxisto); TF (tratamento com fonolito); N (não); S (sim).

O TC foi o tratamento que apresentou mais parâmetros fora do índice de qualidade, tendo como diferença em relação aos outros tratamentos o teor de carbono orgânico abaixo de 15%, como o encontrado por Höfig *et al.* (2022) em estudo de compostagem utilizando o mesmo remineralizador.

Nenhum tratamento conseguiu atingir o parâmetro de qualidade para relação AH:AF. Esta é tida como referência para o grau de humificação de compostos orgânicos e, quanto maior a relação AH:AF, mais humificado é o composto (IGLESIAS-JIMENEZ; PEREZ-GARCIA, 1992; RIFFALDI *et al.*, 1992). Ko *et al.* (2008) afirmam que um composto bem humificado deve apresentar relação AH:AF maior que 1,6. Contudo, Bernal *et al.* (1996) constatam que não é possível estabelecer um valor universal para descrever e prever o grau de maturação de compostos com composições distintas. Garcia-Gómez *et al.* (2005) encontram valor da relação AH:AF que variam 0,5 e 2,0 de acordo com o adubo avaliado. Já Francou *et al.* (2005) diagnosticaram variações entre 1,2 e 4,3 em diferentes materiais compostados.

Entretanto, em nenhum tratamento ocorreu por completo a fase de maturação da compostagem. Considerando o efeito, em clima tropical, da matéria orgânica não decomposta na melhora da atividade biológica e estrutura do solo (PRIMAVESI, 2021), em alguns locais no Brasil, tem-se terminado o manejo da compostagem antes da fase de maturação, para que essa fase ocorra no solo, sendo entendido o valor da relação AH:AF próximo de 1 como o indicado para compostos aplicados em solos de clima tropical. Magalhães *et al.* (2021), por exemplo, consideraram o composto produzido com resíduos da agroindústria do palmito pronto com 45 dias. Isto é, indica-se o uso de compostos estabilizados, após ultrapassar a fase termofílica (BERTON *et al.*, 2021), mas menos maturados, desde que aplicados com antecedência em relação ao plantio das culturas (BRITO *et al.*, 2017), porque as moléculas mais facilmente biodegradáveis que ainda existem serão mineralizadas pelos microrganismos do solo (RAMÍREZ; MATOS, 2022). Höfig *et al.* (2022) utilizaram a mesma estratégia visando, por exemplo, maior rendimento do composto em toneladas de matéria seca e menores perdas de N e C.

No tocante a variação dos teores dos elementos químicos na matéria prima inicial do composto e dos produtos finais (Tabela 12), em todos os tratamentos o teor de nitrogênio diminuiu, mas apenas o TC, com menor proporção do grupo de microrganismos diazotróficos livres e maior quantidade de cálcio, apresentou diminuição de nitrogênio acima do limite aceitável de 20% (KOEPP *et al.*, 1983) (Tabela 8). O fósforo, que não foi contabilizado na análise das matérias primas, apareceu em todos os compostos, o que demonstra que os materiais orgânicos possuíam este elemento e foram disponibilizados pela ação da enzima fosfatase ácida. Da mesma forma, o silício, não avaliado nas análises dos resíduos orgânicos, aumentou no TF e TC. Já que os valores existentes em cada uma dessas duas rochas são distintos e os números finais não foram estatisticamente diferentes, possivelmente esse elemento existe nas matérias primas orgânicas. Contudo, em todos tratamentos o silício da rocha possivelmente foi liberado.

**Tabela 12 - Variação dos teores dos elementos químicos na matéria prima inicial e nos produtos finais.**

Elementos	Tratamento com fonolito			Tratamento com micaxisto			Tratamento com calcixisto		
	Inicial*	Final**	Variação	Inicial*	Final**	Variação	Inicial*	Final**	Variação
	%								
<b>Nitrogênio (N)</b>	1,38	1,18	86,00	1,38	1,27	92,54	1,38	0,98	71,47
<b>Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	0,00	0,74	174,00	0,00	0,75	175,00	0,00	0,74	174,00
<b>Potássio (K<sub>2</sub>O)</b>	6,45	1,92	29,82	3,83	1,77	46,25	3,37	1,48	43,94
<b>Cálcio (Ca)</b>	3,47	2,65	76,40	3,76	2,7	72,61	6,92	5,25	75,89
<b>Magnésio (Mg)</b>	0,47	0,34	71,18	1,28	0,86	67,42	2,09	1,8	86,18
<b>Enxofre (S)</b>	1,12	0,62	55,46	1,12	0,64	57,25	1,12	0,71	63,21
<b>Silício (Si)</b>	7,12	10,47	146,94	10,62	10,6	99,81	7,32	10,87	148,37
<b>MOT</b>	70,00	29,65	42,36	70,00	31,09	44,41	70,00	23,4	33,43

\* Com exceção do N e MOT, o extrator utilizado para determinação nos resíduos orgânicos e no gesso foi ácido clorídrico. Para N e MOT, foi usado o ácido sulfúrico. Nas rochas moídas, utilizou-se determinação por fluorescência de raio-x.

\*\*Nitrogênio total digestão sulfúrica (Kjeldahl); Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) determinação por espectrofotômetro pelo método com a solução de vanadomolibdica; Potássio (K<sub>2</sub>O) fotometria de chama; Enxofre (S) gravimétrico de sulfato de bário; Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extração com HCl por espectrofotômetro de absorção atômica; Silício (Si) Korndörfer *et al.*, 2004.

Legenda: MOT (Matéria Orgânica Total).

A redução do teor de matéria orgânica aconteceu em todos tratamentos. Com o aquecimento da massa enleirada, grande parte da matéria orgânica é perdida, principalmente na forma de CO<sub>2</sub> e água, ocasionando assim a concentração da matéria mineral. A maior diminuição de matéria orgânica ocorreu no TC, uma vez que a mineralização do carbono orgânico é estimulada pelo aumento do pH e pelo fornecimento dos íons cálcio e magnésio (McLEAN *et al.*, 1967). Neste sentido, o calcixisto tem os maiores teores de cálcio e magnésio e apresentou o composto final com maior pH e menor teor de matéria orgânica.

A lixiviação ocorre quando grande parte dos nutrientes se encontra na forma solúvel. Acredita-se que esta seja uma das principais responsáveis pela variação dos dados encontrados na literatura (ORRICO JÚNIOR, *et al.*, 2012). Mesmo com um manejo de compostagem bem conduzido e fora do período de chuva, esta pode ter sido uma das causas das perdas de potássio, bem como a mineralogia dos materiais, que pode não ter permitido sua disponibilização. As micas são fontes de potássio, mas a biotita, existente no micaxisto e no calcixisto, apresenta maior potencial para liberar esse nutriente no curto e no médio prazo, enquanto a muscovita, existente nas três rochas, tende a fornecer potássio no longo prazo. Já os carbonatos, mais presentes no calcixisto, são reconhecidamente reativos, promovem correção de acidez e fornecem cálcio e magnésio.

A albita, fonte de silício no longo prazo, e o quartzo e a ilmenita, inertes em um prazo de décadas, estão presentes no micaxisto (TARDY; DUPLAY, 1992; WIELAND *et al.*, 1988).

Ainda assim, a presença de ions  $H^+$  aumenta a protonação na superfície mineral e enfraquece as ligações de metal-oxigênio da estrutura do mineral. Espera-se que um decréscimo no pH, o que acontece durante a primeira fase do processo de compostagem, aumente a taxa de dissolução de minerais silicatados. Os ácidos orgânicos presentes na matéria orgânica ou exsudados por microrganismos e plantas podem facilitar a intemperização de minerais pela formação de complexos orgânico-metálicos ou pela liberação de  $H^+$  (HARLEY; GILKES, 2000). Estudos demonstram a ação destes ácidos na dinâmica de liberação de potássio de minerais (SONG; HUANG, 1988) e pela acidificação do meio (STILLINGS; BRANTLEY, 1995).

Assim, provavelmente a compostagem disponibilizou parte do K. Mesmo com a diminuição relativa do potássio causada pela lixiviação da parte solúvel ou a sua indisponibilidade, as rochas moídas com mais potássio apresentaram o produto final com maior teor desse elemento, o que demonstra que houve liberação do K que constitui as rochas moídas. O TM foi o que apresentou menores perdas relativas de potássio, seguido do TC, possivelmente pela retenção de potássio nos minerais neoformados. O TF, com granulometria com menos que 80% passante na peneira de 0,3 mm, apresentou o menor aproveitamento. O maior aproveitamento de K geralmente define a melhor relação custo/benefício.

O mesmo raciocínio vale para o Ca e Mg, em que pode ter ocorrido a lixiviação, mas também aconteceu disponibilização, e as rochas moídas com maiores proporções desses elementos também apresentaram maiores teores nos produtos finais. Nota-se, no geral, maior liberação de Ca do que de Mg, com o TM tendo pior rendimento para este elemento. Estes dois nutrientes foram mais disponibilizados que o potássio.

Ressalta-se também que nem todo enxofre do gesso foi disponibilizado ou parte foi lixiviada, já que este elemento, na forma de sulfato, fica propenso à lixiviação (CHEN *et al.*, 1999).

## 4 CONCLUSÕES

Ocorreu uma compostagem eficiente em todos tratamentos, demonstrado pela caracterização da fase termofílica e ausência de coliformes totais e de germinação de plantas espontâneas.

O tratamento com fonolito demandou manejos mais frequentes pelo fato desta rocha moída reter menos água.

Nenhum tratamento apresentou a relação AH:AF dentro do parâmetro de qualidade, já que a compostagem foi encerrada, de forma estratégica, no início da fase de maturação, logo após a estabilização.

O tratamento com calcixisto apresentou um número menor de índices dentro dos parâmetros de qualidade em relação aos outros tratamentos com outros agrominerais silicáticos.

A compostagem disponibilizou parte dos nutrientes que estavam retidos em forma de silicatos e carbonatos. O Ca foi o elemento mais disponibilizado, seguido pelo Mg e, depois, K.

O tratamento com micaxisto demonstrou a menor diminuição relativa de potássio entre as matérias primas originais e o produto final, o que, geralmente, define a melhor relação entre custo e benefício. O tratamento com fonolito apresentou o menor rendimento.

Os tratamentos com micaxisto e fonolito apresentaram perda de nitrogênio dentro do limite aceitável de 20%.

Este estudo possibilitou comprovar que é possível produzir fertilizantes orgânicos de qualidade com fontes regionais de nutrientes.

## **CAPÍTULO IV - COMPORTAMENTO DOS SOLOS, PRODUÇÃO DE CAFÉ E QUALIDADE DA BEBIDA EM DOIS DIFERENTES SISTEMAS DE ADUBAÇÃO USANDO FONTES REGIONAIS E CONVENCIONAIS DE NUTRIENTES**

### **Resumo**

A cafeicultura tem histórica relevância geopolítica e econômica no Brasil. O caminho técnico e químico da agricultura industrial passou por um desenvolvimento extraordinário, com a ajuda de enorme aparato, tanto da ciência quanto da indústria química e tecnológica. Entretanto, como consequência da agricultura industrial, ao longo do tempo, notou-se uma redução da renda por unidade de produto produzido, já que o produtor rural usualmente se depara com setores comerciais concentrados ou oligopolizados para a compra de seus insumos e precisa vender seus produtos com preços formados pela livre concorrência. Ademais, é evidente que, baseados em recursos finitos, nutrientes essenciais em algum momento não estarão mais disponíveis para a agricultura convencional. Este trabalho objetivou avaliar o comportamento dos solos, a produção de café e a qualidade de bebida após utilizar dois sistemas de adubação em lavoura cafeeira em Unaí, noroeste do estado de Minas Gerais, no Cerrado Brasileiro. No sistema convencional utilizou-se, como fonte convencionais de nutrientes (FCN), ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. O sistema de adubação utilizando fontes regionais de nutrientes (FRN) utilizou somente adubos produzidos na propriedade agrícola por meio da compostagem conjunta de resíduos orgânicos e rochas moídas. Esses dois sistemas de adubação foram praticados desde o plantio da lavoura até sua primeira colheita. A caracterização dos solos após a aplicação dos fertilizantes foi realizada através da Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo. Após a colheita do experimento a bebida produzida foi avaliada segundo protocolo da Associação Americana de Cafés Especiais. O sistema de adubação com FRN, quando comparado com o FCN, alcançou melhor resultado na função de suprimento de nutrientes e obteve melhor qualidade de bebida.

**Palavras chave:** Fertilizante orgânico; autossuficiência; cafeeiro.

### **Abstract**

Coffee farming has historical geopolitical and economic relevance in Brazil. The technical and chemical path of industrial agriculture has undergone extraordinary development, with the help of enormous apparatus, both from science and from the chemical and technological industry. However, as a consequence of industrial agriculture, over time, a reduction in income per unit of product produced was noted, as rural producers normally face concentrated or oligopolistic commercial sectors to purchase their inputs and need to sell their products with prices formed by free competition. Furthermore, it is clear that, based on finite resources, essential nutrients will at some

point no longer be available for conventional agriculture. This work aimed to evaluate the behavior of soils, coffee production and the quality of the drink after using two fertilizer systems in coffee work in Unaí, northwest of the state of Minas Gerais, in the Brazilian Cerrado. No conventional system was used, such as conventional nutrient source (FCN), urea, simple superphosphate and potassium chloride. The fertilizer system uses regional sources of nutrients (FRN) using only fertilizers produced on the agricultural property through composting together of organic waste and ground rocks. These two fertilizer systems were practiced from the planting of the crop until its first harvest. The characterization of the soils after the application of fertilizers was carried out using Embrapa Soil Bioanalysis Technology. After harvesting the experiment, the drink produced was evaluated according to the protocol of the American Specialty Coffee Association. The FRN fertilizer system, when compared to the FCN, achieved better results in the nutrient supply function and obtained better drink quality.

**Keywords:** Organic fertilizer; self-sufficiency; coffee tree.

## 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura tem histórica relevância geopolítica e econômica no Brasil, já que moldou e ainda molda as diversas formas de apropriação e uso do imenso patrimônio natural que forma nosso país (IBGE, 2016). O cafeeiro é cultivado em diferentes sistemas de manejo e representa importante fonte de renda e empregos no Brasil, que é o maior produtor e exportador mundial há mais de um século e meio (COELHO, 2002; DAVIS *et al.*, 2006).

O caminho técnico e químico da agricultura industrial passou por um desenvolvimento extraordinário, com a ajuda de enorme aparato, tanto da ciência quanto da indústria química e tecnológica (WISTINGHAUSEN *et al.*, 2000). Entretanto, como consequência da agricultura industrial, ao longo do tempo, notou-se uma redução da renda por unidade produzida, já que o produtor rural usualmente se depara com setores concentrados ou oligopolizados para a compra de seus insumos (PERES *et al.*, 2010) e precisa vender seus produtos com preços formados pela livre concorrência (STEENBOCK, 2021).

Ademais, é evidente que, baseados em recursos finitos, nutrientes essenciais em algum momento não estarão mais disponíveis para a agricultura convencional (WISTINGHAUSEN *et al.*, 2000), visto que, com a simplificação do ecossistema, necessita-se de constante aportes de insumos químicos, que melhoram os rendimentos temporariamente e dão como resultado elevados custos ambientais e sociais (ALTIERI, 2002). Portanto, é necessário desenvolver e incrementar tecnologias que possam aproveitar ao máximo as oportunidades locais com o mínimo uso de insumos externos. A regionalização significa menos transporte, cadeias de produção transparentes e uma dependência reduzida dos fluxos de capitais das multinacionais (LATOUCHE, 2018), uma vez que ela não é excludente em relação à escala e é adaptável às distintas realidades (ALTIERI, 2002).

Nesta perspectiva, entende-se que a busca por uma cafeicultura rentável e permanente passa pela valorização das fontes de nutrientes disponíveis na região, o que fornece mais autonomia para o setor rural no tocante a sua adubação. Novas práticas e novos conhecimentos calcados na otimização dos recursos disponíveis na própria unidade de produção agrícola, na participação dos agricultores e na valorização de seus saberes empíricos são ferramentas essenciais para uma produção mais sustentável (CANELLAS *et al.*, 2005). A nutrição de plantas em sistemas ecológicos é fundamentada no recurso

solo e busca minimizar perdas, priorizando a adição de adubos orgânicos obtidos na própria propriedade ou região (PENTEADO, 2010).

É difícil, porém, a comparação entre dois sistemas com princípios distintos. Enquanto Liebig (1865), precursor da adubação mineral, dizia que adubar é repor os nutrientes do solo, Steiner (2017), no primeiro movimento de uma agricultura ecológica, em 1924, conceituava que adubar quer dizer vivificar o solo. Howard (2007), pioneiro na agricultura orgânica, acreditava que não levar em consideração a vida no solo e entender que toda deficiência encontrada na solução do solo pode ser corrigida mediante o emprego de substâncias químicas adequadas é um completo equívoco em termos nutrição vegetal. O mesmo autor aponta que a experiência tem demonstrado que o valor dos adubos orgânicos, baseando-se na oferta e na demanda, apresenta uma relação de 2 a 2,5 vezes maior que aquele calculado pelas análises químicas em função da maior eficiência de uso dos nutrientes em comparação aos adubos químicos sintéticos.

Em princípio, nas adubações orgânicas não é necessário usar as doses de nutrientes que são requeridas em adubações minerais, porque a liberação de nutrientes é mais lenta e gradual, favorecendo sua absorção pelas plantas e minimizando as perdas. Além disso, a disponibilização de nutrientes é maior, relativamente às de adubações minerais, porque os adubos orgânicos ativam a microflora e a fauna, melhorando as propriedades físicas do solo (KOLLER, 2005). Por outro lado, se considera que apenas 50% do N, 60% do P e 100% do K presentes no composto orgânico são liberados no primeiro ano de cultivo (BERTON *et al.*, 2021). Já Laforet (2013) aponta aproveitamento de 50, 20-50 e 60% para os fertilizantes minerais de N, P e K, respectivamente, embora Matiello e Garcia (2014) afirmem que não existem definições precisas sobre os níveis de aproveitamento desses produtos. Em termos gerais, os autores consideram que, em média, os adubos minerais nitrogenados têm 50-70% de aproveitamento, os fosfatados 30-50% e os potássicos 80-90%.

Neste sentido, este trabalho objetivou avaliar o comportamento dos solos, a produção e a qualidade da bebida de cafeeiros sob dois sistemas de adubação, em Unaf, noroeste de Minas Gerais. Um sistema baseado em adubação convencional (FCN), com fertilizantes solúveis de síntese química, e, o outro sistema, fundamentado em fontes regionais de nutrientes (FRN), utilizando fertilizantes produzidos através de compostagem conjunta de resíduos orgânicos e rochas moídas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O método adotado na presente pesquisa foi composto pelas etapas mostradas na Figura 8.

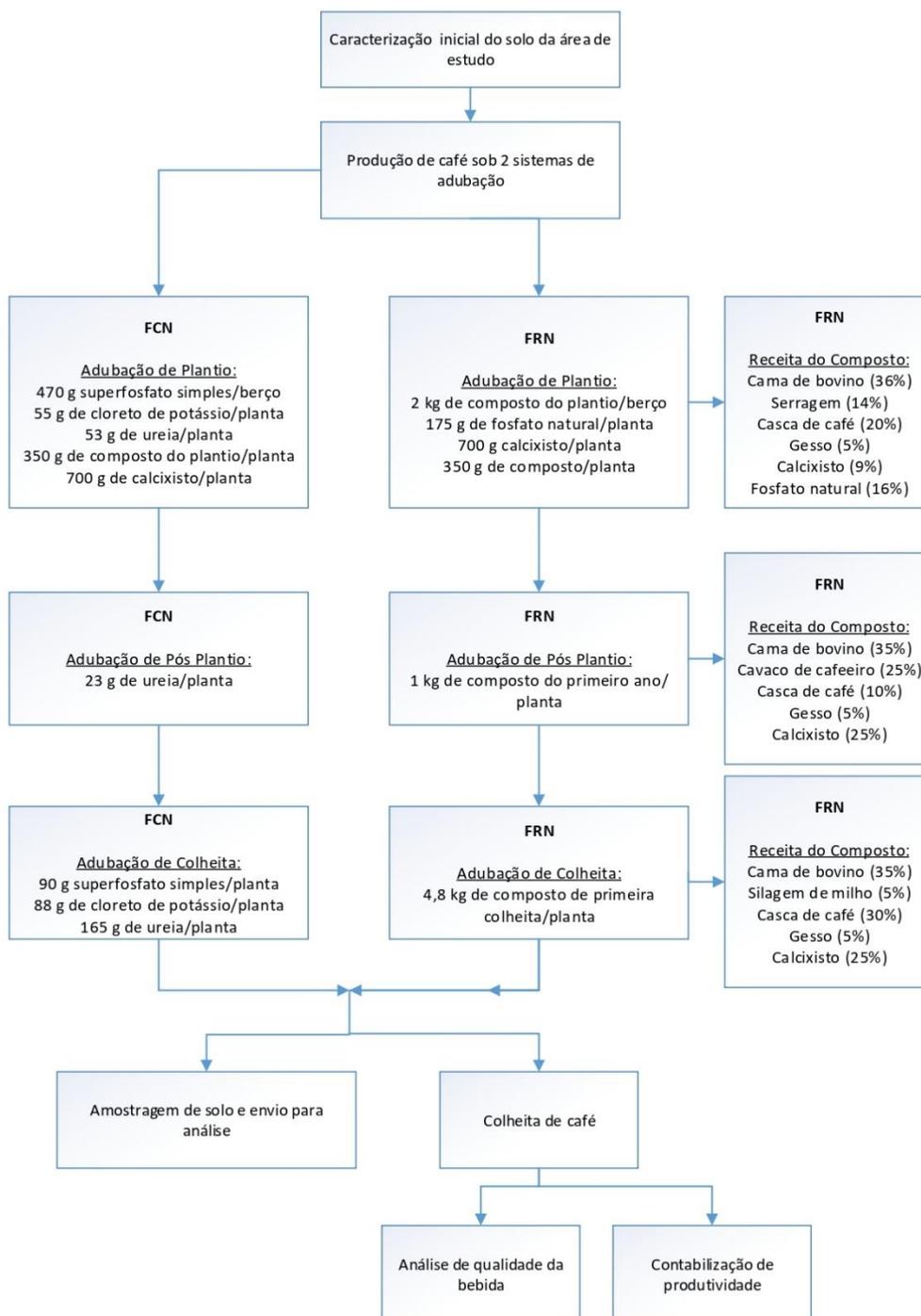


Figura 8 - Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa.

## 2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A pesquisa foi realizada na Fazenda Ouro Verde, em Unaí, Minas Gerais, localizada na mesorregião do Noroeste de Minas Gerais (Figura 9) (IBGE, 2019), no bioma Cerrado (IBGE, 2012).

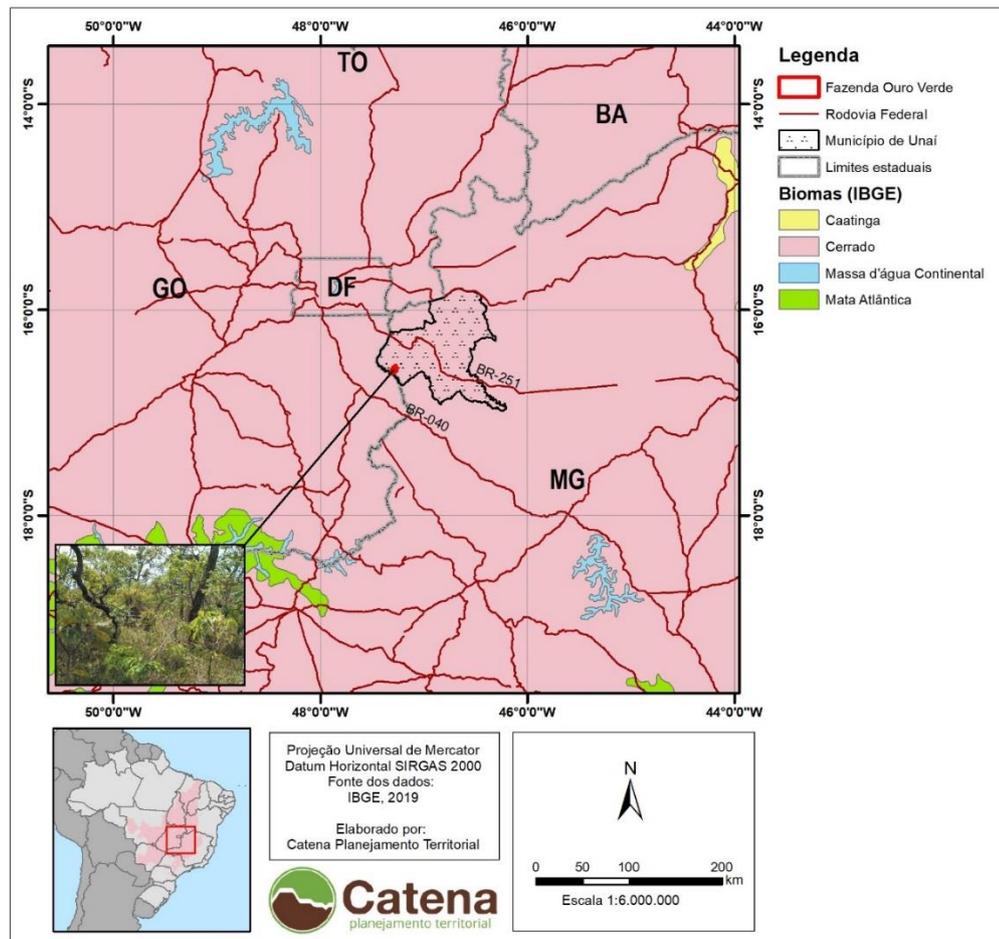


Figura 9 - Localização da fazenda Ouro Verde.

O local situa-se em clima classificado por Köppen como Aw, caracterizado como clima tropical com estação seca no inverno (AYOADE, 2003). A área experimental foi instalada em um setor irrigado por pivô central, em um Latossolo Amarelo Distrófico petroplíntico com textura argilosa (HÖFIG; GIASSON, 2015). As características iniciais do solo estão apresentadas na Tabela 13.

**Tabela 13 - Caracterização geral do solo da área de estudo antes da instalação do experimento.**

<b>Análise</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>	
<b>Química</b>	pH em água		5,33	
	Fósforo total	mg/kg	522	
	Silício solúvel		<1,0	
	Matéria orgânica	%	1,79	
	Carbono orgânico total		1,05	
	Fósforo (Mehlich)	mg/dm <sup>3</sup>	< 0,3	
	Potássio		90,29	
	Enxofre		10,57	
	Cálcio	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	2,42	
	Magnésio		0,88	
	Alumínio		< 0,1	
	CTC potencial		6,43	
	<b>Textural</b>	V	%	54
		m		0
Silte		33,3		
Argila		47		
Areia		19,7		
<b>Biológica</b>		Arilsulfatase		µg PNG/g
	B-glicosidase	solo/h	80,2	

Legenda: PNG (p-nitrofenil-β-D-glicosídeo).

A área de estudo foi utilizada com pastagem entre 1997 e 2017. Após esse período, instalou-se um sistema de irrigação por pivô e o local passou a ter um manejo convencional para lavouras anuais. A partir de janeiro de 2021 foi implantada a lavoura de café (Tabela 14).

**Tabela 14 - Histórico de uso do solo na área do experimento.**

Ano	Uso		
	Primeira safra	Segunda safra ou adubação verde	Terceira safra ou adubação verde
<b>1997 a 2017</b>	Pastagem		
<b>2017/18</b>	Soja ( <i>Glycine max</i> )	Milho ( <i>Zea mays</i> )	-
<b>2018/19</b>	Feijão carioca ( <i>Phaseolus vulgaris Pinto Group</i> )	<i>Crotalaria juncea</i>	Aveia preta ( <i>Avena strigosa Schreb</i> )
<b>2019/20</b>	Feijão carioca ( <i>Phaseolus vulgaris Pinto Group</i> )	Milho ( <i>Zea mays</i> )	Nabo forrageiro ( <i>Brassica rapa</i> )
<b>A partir de 2021</b>	Café arábica ( <i>Coffea arabica L.</i> )		

O experimento foi conduzido em lavoura cafeeira plantada com a variedade Catuaí IAC 144, com delineamento inteiramente casualizado, composto de dois tratamentos e dez repetições de cada tratamento (Figura 10). Cada parcela possuía três linhas de 30 plantas, considerando as duas linhas de fora e as cinco primeiras e cinco últimas plantas da linha intermediária como bordadura. O espaçamento entre plantas foi de 0,5 m e de 3,90 m entre linhas, totalizando 5.128 plantas/ha.



Figura 10 - Início do experimento implantado.

## 2.2 SISTEMAS DE ADUBAÇÃO

No sistema convencional (FCN) a adubação foi realizada aplicando-se ureia (45% N), superfosfato simples (16 a 18% de  $P_2O_5$ ) e cloreto de potássio (50% de  $K_2O$ ). A adubação feita com fontes regionais de nutrientes (FRN) utilizou adubos produzidos na fazenda com a compostagem conjunta de resíduos orgânicos com rochas moídas, sendo que em cada um dos três anos se utilizou compostos com composições diferentes (Tabela 15). Esses dois sistemas foram praticados desde o plantio da lavoura até sua primeira colheita, 30 meses após o plantio (Tabela 16). Com exceção desses sistemas de adubação, o restante do manejo foi realizado de forma idêntica nas duas áreas, com três aplicações de fungicidas, inseticidas, herbicidas e micronutrientes por ano.

Tabela 155 - Composição dos compostos utilizados.

Adubação de:					
Plantio		Primeiro ano pós plantio		Primeira colheita	
Material	Proporção no composto (%)	Material	Proporção no composto (%)	Material	Proporção no composto (%)
Cama de bovino	36	Cama de bovino	35	Cama de bovino	35
Serragem	14	Cavaco de cafeeiro	25	Silagem de milho	5
Casca de café	20	Casca de café	10	Casca de café	30
Gesso	5	Gesso	5	Gesso	5
Calcixisto	9	Calcixisto	25	Calcixisto	25
Fosfato natural	16	-	-	-	-

Para o plantio no setor de FCN, foram utilizados os parâmetros de adubação de plantio apontados por Mesquita *et al.* (2016b), que se baseou na Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999). Sendo assim, foi aplicado no sulco, por berço, 470 g de superfosfato simples, além de 350 g de composto e 700 g de calcixisto, para suprir as necessidades de matéria orgânica e cálcio, respectivamente. A adubação potássica consistiu de três aplicações em cobertura de 18,3 g de cloreto de potássio por planta. A adubação nitrogenada consistiu de 53 g de ureia/planta, divididos em quatro aplicações no verão (Figura 11).



**Figura 11 - Primeira adubação de cobertura no sistema convencional.**

Para a adubação de plantio no sistema FRN, foram aplicados no sulco 2 kg de composto/planta (Figura 12). A composição do material compostado e características do composto para plantio (HÖFIG *et al.*, 2022) estão nas tabelas 15 e 17, respectivamente.

**Tabela 166 - Sistemas de adubações utilizados ao longo do experimento.**

Adubação de:	Sistema	
	Fonte Convencionais de Nutrientes	Fontes Regionais de Nutrientes
Plantio	470 g superfosfato simples/berço	2 kg de composto do plantio/berço
	55 g de cloreto de potássio/planta	175 g de fosfato natural/planta
	53 g de ureia/planta	350 g de composto/planta
	350 g de composto do plantio/planta	700 g de calcixisto/planta
	700 g de calcixisto/planta	
Pós plantio	23 g de ureia/planta	1 kg de composto do primeiro ano/planta
Colheita	90 g superfosfato simples/planta	4,8 kg de composto de primeira colheita/planta
	88 g de cloreto de potássio/planta	
	165 g de ureia/planta	

Foram realizados ajustes na adubação para equalizar, na medida do possível, as quantidades dos nutrientes NPK nos dois tratamentos. Com isso, no tratamento FRN, na adubação de plantio, foi adicionado, além do composto, mais 175 g/planta de fosfato natural. Da mesma forma, acrescentou-se mais 700 g de calcixisto e 350 g de composto por planta, para equilibrar as condições do manejo convencional no tocante ao teor de fósforo, matéria orgânica e cálcio sugerido por Mesquita *et al.* (2016b).



**Figura 12 - Adubação de sulco no sistema com fontes regionais de nutrientes.**

No sistema FRN, no primeiro ano pós plantio e na adubação de produção, a aplicação do composto foi na ordem de 1 kg/planta (Figura 13). Independente da análise de solo, essa foi a adubação sugerida, tendo em vista que o composto é a única fonte de nitrogênio desse sistema. A composição inicial do composto e características do composto produzido para o primeiro ano pós plantio (HÖFIG *et al.*, 2023a) estão nas tabelas 16 e 17.



**Figura 13 - Adubação do primeiro ano pós-plantio no sistema com fontes regionais de nutrientes.**

Já no manejo FCN, no primeiro ano, foi considerada a adubação de primeiro ano pós-plantio apontada por Mesquita *et al.* (2016b), conforme recomendações da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999). Sendo assim, utilizou-se 23 g de ureia/planta, divididas em três aplicações no período chuvoso (Figura 14). Esse se valor assemelhou ao teor de N utilizado no sistema FRN no primeiro ano pós plantio. Neste ano, no entanto, Mesquita *et al.* (2016b), baseado na Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999), não recomendam a adubação fosfatada no caso dela ter sido feita no plantio conforme a orientação.



**Figura 14 - Adubação do primeiro ano pós-plantio no sistema convencional.**

Em relação ao potássio, devido ao alto valor desse nutriente apontado na análise química de solo na área do sistema FCN ( $K_2O > 200 \text{ mg/dm}^3$ ), Mesquita *et al.* (2016b), baseado na Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999), não recomendam a adubação com esse elemento. Por isso, não houve adubação potássica nesse sistema no primeiro ano pós plantio.

Tabela 17 - Características dos compostos utilizados.

Determinação*	Unidade	Base	Parâmetro	Plantio	Pós plantio	Colheita
				Valores		
pH CaCl <sub>2</sub>	-	Úmida	Químico	7,8	8,3	7,73
Relação C:N	-			11	13	13
Densidade	g.cm <sup>-3</sup>			0,62	0,55	0,73
Umidade				32,2	35,27	23,97
Nitrogênio Total	%	Seca		1,22	1	0,98
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )				2,1	0,83	0,74
Potássio (K <sub>2</sub> O)				1,65	1,19	1,48
Cálcio (Ca)				5,37	7,94	5,25
Magnésio (Mg)				0,88	1,85	1,80
Enxofre (S)				0,21	0,8	0,71
Silício (Si)				4,8	13,6	10,87
CTC efetiva				mmolc.kg <sup>-1</sup>	340	220
Matéria orgânica total	%		Orgânico	26,67	23,27	23,40
Carbono orgânico				12,89	12,93	13
Ácido húmico (AH)	g.kg <sup>-1</sup> C orgânico			12,46	21,64	9,92
Ácido fúlvico (AF)				10,44	15,97	8,45
Relação AH:AF		1,19		1,36	1,18	
Fosfatase ácida		µg PNF.g <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>		982	818	779,67
B-glicosidase	µg PNG.g <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	517		189	169	
Microrganismos celulolíticos	NMP.g <sup>-1</sup>	Úmida		Biológico	4,3 x 10 <sup>6</sup>	4,62E+07
Microrganismos diazotróficos			2,4 x 10 <sup>4</sup>		9,17E+01	5,44E+01
Taxa de germinação P.I. – areia	%		80		50	80
Taxa de germinação P.I. – 1%			90		60	86,67
Coliformes totais	Presença/ausência		Sanitário	Ausência	Ausência	Ausência
Germinação daninhas						

pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 M determinação potenciometria; Densidade (m/v); Umidade 60-65° determinação por umidade; Carbono Orgânico (CO) oxidação dicromato seguido de titulação; Nitrogênio total digestão sulfúrica (Kjeldahl); Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) determinação por espectrofotômetro pelo método com a solução de vanadomolibdica; Potássio (K<sub>2</sub>O) fotometria de chama; Enxofre (S) gravimétrico de sulfato de bário; Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extração com HCl por espectrofotômetro de absorção atômica; Silício Korndörfer *et al.*, 2004; Relação C:N cálculo, Capacidade de troca de cátions (CTC) (BRASIL, 2017). Matéria Orgânica Total por combustão em Mufla (ALCARDE, 2009.). AH e AF: Benites *et al.*, 2003. Coliformes totais e fecais kit COLItest® realizado conforme as especificações do fabricante. Determinação de presença ou ausência de plantas daninhas por testes de germinação conduzidos em ambiente controlado. Fosfatase ácida e beta-glicosidase: Tabatabai, 1994. Microrganismos: Kasana *et al.*, 2008 e Döbereiner *et al.*, 1995. Taxa de germinação de plantas indicadoras (P.I.) conduzida com experimentos em microcosmos em ambiente controlado utilizando sementes de alfaca. PNF (Paranitrofenil fosfato). PNG (p-nitrofenil-β-D-glicosídeo). NMP (número mais provável).

No ano agrícola referente à primeira colheita, no sistema FCN, foi feita a adubação de produção indicada por Mesquita *et al.* (2016c), adaptando recomendações da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999). Nesse caso, considerou-se o número de 5.128 plantas/ha, a produtividade esperada de 3 L de café cereja por planta, percentual de matéria orgânica no solo e percentual de potássio em relação à CTC, além do fósforo disponível. Portanto, realizaram-se quatro aplicações no

período chuvoso com total 165 g de ureia/planta e total de 88 g de cloreto de potássio/planta, além de uma dose única de 90 g de superfosfato simples/planta. Para o sistema FRN, utilizou-se a quantidade de composto para se equilibrar, na medida do possível, a quantidade de NPK do sistema FCN, com a necessidade de igualar primeiramente o nitrogênio, pois o composto é a única fonte deste elemento para esse sistema de manejo. Portanto, foram aplicados 4,8 kg composto/planta. As informações do composto utilizados na adubação para primeira colheita (HÖFIG *et al.*, 2023b) estão nas tabelas 15 e 17.

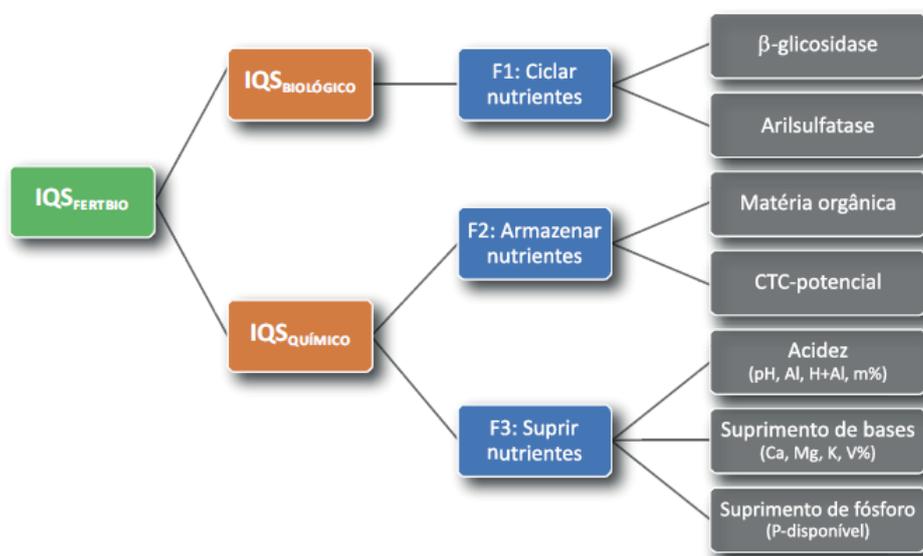
### 2.3 ANÁLISE DOS SOLOS DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS

Para a análise dos solos das parcelas experimentais foram realizadas amostragens em fevereiro de 2023, após 28 meses de manejo, desde o início do preparo de solo para o plantio, e quatro meses antes da primeira colheita. As amostragens foram feitas a um palmo do tronco do pé de café, onde há maior exploração do sistema radicular. Para cada tratamento foram coletadas três amostras compostas formadas por 10 sub-amostras retiradas em diferentes pontos de cada repetição de cada tratamento e homogeneizadas em um balde de plástico, totalizando 250g de solo. Para a análise química, a profundidade amostrada foi de 0 a 20 cm (EMBRAPA, 2005) e, para a análise biológica foi de 0 a 10 cm (MENDES *et al.*, 2021). Foram calculadas a média e o desvio padrão de cada um dos parâmetros das três repetições referentes a cada tratamento. A verificação dos pressupostos da Análise de Variância (ANOVA) consistiu nos testes de normalidade, homogeneidade e análise de resíduos. Uma vez atendidos, foi conduzida a ANOVA e o teste de comparação de médias. Quando os pressupostos não eram satisfeitos, foi feita a transformação de dados, com re-avaliação dos pressupostos, e ANOVA de dados transformados. Se mesmo com a transformação de dados, os pressupostos ainda não eram satisfeitos, procedeu-se a análise não paramétrica. Todos os testes foram feitos para um nível de significância de 5%.

As características analisadas foram selecionadas de acordo com o proposto pela Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS). Ela consiste na análise e na interpretação das atividades das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase, permitindo acessar o funcionamento da maquinaria biológica do solo, complementarmente às análises tradicionais de fertilidade do solo. A BioAS também abrange o cálculo do desempenho de três funções essenciais do solo relativas a nutrientes, que consistem na função ciclar

(F1), função armazenar (F2) e função suprir (F3). A função ciclar nutrientes é a base para o cálculo do IQS<sub>BIOLOGICO</sub> (Índice de Qualidade Biológica do Solo), sendo as outras duas funções utilizadas no cálculo do IQS<sub>QUIMICO</sub> (Índice de Qualidade Química do Solo). Por sua vez, esses dois índices são aplicados no cálculo do IQS<sub>FERTBIO</sub> (Índice de Qualidade do Solo FertBio), que expressa a qualidade química e biológica do solo em um único índice (Figura 15).

Os IQS e os escores das funções variam de 0 a 1, com as classes de interpretação tendo intervalos de 0,2, onde 0 é muito baixo e 1 é muito alto: quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho da função e melhor o IQS. Os valores de atividade enzimática, os IQS e os escores das três funções são calibrados em relação ao rendimento de grãos e à matéria orgânica do solo (MOS), levando-se em consideração os teores de argila do solo. A proposta foi baseada nas relações dos bioindicadores com o rendimento relativo acumulado (RRA) de grãos de soja e milho e com os teores de MOS. Todos os atributos microbiológicos foram correlacionados positivamente com o RRA e com a MOS, o que possibilitou, por meio de análises de regressão, a delimitação de classes de suficiência para cada enzima de acordo com os seguintes critérios:  $\leq 40\%$  do RRA: baixo; de 41% a 80% do RRA: moderado; e  $> 80\%$  do RRA: adequado (MENDES *et al.*, 2021).



**Figura 15 - Modelo dos IQSs FertBio, Biológico e Químico e suas relações com as funções do solo (F1, F2 e F3) e respectivos indicadores obtidos por meio da análise do solo. Fonte: Mendes *et al.*, 2021.**

Para avaliar e comparar com os índices calculados a partir dos dados experimentais, como ainda não existem índices de referência para a cultura do café, foram utilizados os índices de referência de qualidade utilizados para a cultura do milho.

## 2.4 PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DA BEBIDA

Tendo a florada principal dos cafeeiros ocorrido no dia 25 de setembro de 2022 nos dois tratamentos, a colheita foi realizada no dia 13 de junho de 2023, na forma de derrça total no pano (MESQUITA *et al.*, 2016a) (Figura 16), aproximadamente 30 meses após o plantio. Os frutos foram secos de forma suspensa até atingir entre 11% e 12% de umidade (SENAR, 2017) (Figura 17). Após secos, os frutos foram imediatamente descascados. Foram coletadas três amostras de 800 g de café descascado cru de cada tratamento para realização das análises sensoriais.



Figura 16 - Colheita manual dos cafeeiros na forma de derrça total no pano .

A produtividade de café cereja por planta foi medida em cada parcela e foi calculada a média. A verificação dos pressupostos da Análise de Variância (ANOVA) consistiu nos testes de normalidade, homogeneidade e análise de resíduos. Uma vez atendidos, foi conduzida a ANOVA e o teste de comparação de médias. Quando os pressupostos não eram satisfeitos, foi feita a transformação de dados, com re-avaliação dos pressupostos, e ANOVA de dados transformados. Se mesmo com a transformação de dados, os pressupostos ainda não eram satisfeitos, procedeu-se a análise não paramétrica. Todos os testes foram feitos para um nível de significância de 5%. Já a produtividade medida sacos de 60 kg de café limpo por hectare foi feita considerando a média de todo café colhido nas áreas totais de cada tratamento.



**Figura 17 - Secagem do café em terreiro suspenso.**

As análises sensoriais das bebidas foram realizadas por quatro provadores certificados *Q-Grader*, segundo o protocolo da Associação Americana de Cafés Especiais (TSC-SCAA, 2008) (Figura 18). Nessa análise consideram-se os atributos uniformidade, ausência de defeitos, doçura, sabor, acidez, corpo, finalização, equilíbrio, aroma e avaliação global. Os cafés que alcançam nota acima de 80 (de um máximo de 100) são classificados como especiais, conforme TSC-SCAA (2008). Cada especialista provou três amostras de café de cada sistema de adubação. Foi calculada a média e o desvio padrão das notas atribuídas e aplicou-se o Teste t de Welch para análise estatística (WELCH, 1947).



**Figura 18 - Especialista provando café.**

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 SOLOS

Malavolta (1968) acreditava que a fertilidade do solo, como foi definida, está amarrada a propriedades físicas e biológicas do solo, afirmando que não se pode conceber solo fértil em que haja dificuldade para o armazenamento e circulação do ar e da água. Do mesmo modo, o solo não seria fértil se apresentasse dificuldades para a vida de sua flora e fauna. Isto é, o solo deve ser quimicamente equilibrado, fisicamente estruturado e biologicamente ativo. Isso tudo está interligado e só se alcança com um solo vivo, considerando que as qualidades físicas e químicas devem estar equilibradas com as qualidades biológicas do solo (HAFEZ, 1974; PICOLO; MBAGWU, 1990; PAGLIAI; ANTISARI, 1993; SANTOS; CAMARGO, 1999; CRUZ *et al.*, 2017; HATFIELD *et al.*, 2017; MENDES, 2021).

Os resultados das diversas análises realizadas encontram-se na tabela 18. Destaca-se o aumento nos dois sistemas no teor de fósforo, potássio e de matéria orgânica em relação às características iniciais do solo. O aumento desta última é ainda mais acentuado no sistema FRN, classificado como teor adequado, enquanto, no sistema FCN, o teor é médio (LOPES *et al.*, 2018). Como consequência, já na tradagem para amostragem de solo foi muito clara a diferença entre os dois sistemas, pois o solo sob sistema de adubação FRN estava mais poroso e macio.

Já os parâmetros biológicos dos dois sistemas pioraram em relação à análise de caracterização da área (Tabela 13). Possivelmente o manejo de plantas anuais com rotação de culturas é mais benéfico para a vitalidade do solo do que um cafeeiro novo (mesmo que com adubação orgânica), em que se combate com grande intensidade as plantas de crescimento espontâneo e a formação de cobertura do solo ainda é incipiente.

**Tabela 18 - Características medidas três meses antes da colheita nos sistemas com Fontes Regionais de Nutrientes (FRN) e Fontes Convencionais de Nutrientes (FCN).**

Parâmetro	Unidade	FRN			FCN			Fonte
		Média	Desvio padrão	Interpretação	Média	Desvio padrão	Interpretação	
Teor de argila	%	54,00ns	1,63	Argilosa	52,67ns	2,62	Argilosa	-
Silício solúvel		6,67ns	0,50	-	7,60ns	0,43	-	-
Fósforo total	mg/kg	472,49ns	95,59	-	383,36ns	14,22	-	-
pH em água	-	5,97a	0,18	Adequado	4,90b	0,37	Baixo	
Matéria orgânica	dag/kg	3,23a	0,10	Adequado	2,97b	0,09	Médio	Sousa;
Carbono orgânico total		1,87a	0,06	Adequado	1,72b	0,05	Médio	
Fósforo (Mehlich 1)	mg/dm <sup>3</sup>	2,31ns	2,04	Muito baixo	0,64ns	0,25	Muito baixo	Lobato, 2004
Potássio		139,24ns	44,72	Alto	174,65ns	22,14	Alto	
Cálcio	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	2,60ns	0,23	Adequado	1,54ns	0,70	Baixo	Sobral <i>et al.</i> , 2015
Magnésio		0,71a	0,13	Adequado	0,36b	0,13	Baixo	
Alumínio		0,00ns	0,00	Adequado	0,08ns	0,05	Adequado	
CTC efetiva		3,76ns	0,21	Médio	2,46ns	0,85	Baixo	
CTC potencial		6,03ns	0,14	Médio	6,07ns	0,31	Médio	
V	%	60,67a	2,49	Adequado	38,67b	12,12	Baixo	Lopes <i>et al.</i> , 2018
m		0,00ns	0,00	Adequado	4,16ns	3,03	Adequado	
Arisulfatase	µg PNG/g solo/h	61,60ns	7,56	Moderado	51,64ns	3,81	Moderado	Mendes <i>et al.</i> , 2018
Beta-glicosidade		72,68ns	8,74	Baixo	68,91ns	7,77	Baixo	
IQS biológico	-	0,59ns	0,01	Médio	0,55ns	0,04	Médio	Mendes <i>et al.</i> , 2018
IQS químico		0,47ns	0,03	Médio	0,41ns	0,03	Médio	
IQS FertBio		0,51ns	0,02	Médio	0,46ns	0,03	Médio	
Ciclagem de nutrientes (F1)		0,59ns	0,01	Média	0,55ns	0,04	Média	
Armazenamento de nutrientes (F2)		0,48ns	0,05	Média	0,43ns	0,05	Média	
Suprimento de nutrientes (F3)		0,48a	0,02	Média	0,39b	0,03	Baixa	

Legenda: IQS (índice de qualidade do solo); ns (não significativo para o teste a 5% de nível de significância; a (maior média); b (menor média). PNG (p-nitrofenil-β-D-glicosídeo).

Sabe-se que mais importante que a quantidade de microrganismos no solo é a sua atuação, que se exprime pela quantidade de enzimas excretadas. Um solo pode possuir grande número de organismos, porém inativos (PRIMAVESI, 2002). A aplicação de

fertilizantes orgânicos favorece a atividade de algumas enzimas, além de outras propriedades microbianas, quando comparada a adubos minerais (CHANG *et al.*, 2007). Contudo, os dois sistemas apresentaram resultados moderados e baixos para arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidade, respectivamente, e função de ciclagem de nutrientes (F1) média (Tabela 18).

A enzima  $\beta$ -glicosidase atua na etapa final do processo de decomposição da celulose e é responsável pela hidrólise dos resíduos de celobiose, um dissacarídeo de rápida decomposição no solo, liberando como produto a glicose, que atua como importante fonte de energia para os microrganismos (ZAGO *et al.*, 2018). Já a arilsulfatase é uma enzima que participa do ciclo do S no solo ao hidrolisar ligações do tipo éster de sulfato, o que libera íons sulfato (TABATABAI; BREMNER, 1970).

Mendes *et al.* (2015) avaliaram os seguintes tratamentos: a) soja/milho safrinha; b) soja/*Urochloa brizantha*; e c) soja/milho intercalado com *Urochloa ruziziensis*. Oito anos após o início do experimento, a análise de solo mostrou os maiores valores da enzima  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase para o tratamento “b” (179 e 140  $\mu\text{g PNG/g solo/h}$ , respectivamente) e, os piores, para o “a” (108 e 89  $\mu\text{g PNG/g solo/h}$ , respectivamente). Todos os valores foram maiores do que em nosso estudo. Na mesma área de estudo de Mendes *et al.* (2015), Benites *et al.* (2014) reportaram um aumento de produtividade da soja nos tratamentos com braquiária, embora as características químicas do solo da área dos três testes fossem semelhantes, o que demonstra a importância dos fatores biológicos.

Já Mendes *et al.* (2018) estudaram, em sistema de plantio direto, os sistemas soja/pousio e soja/brachiaria. O primeiro apresentou  $\beta$ -glicosidase de 64 e arilsulfatase 28  $\mu\text{g PNG/g solo/ha}$ , resultados, portanto, inferiores aos nossos. No entanto, o segundo sistema mostrou  $\beta$ -glicosidase de 233 e arilsulfatase de 223  $\mu\text{g PNG/g solo/ha}$ . Lisboa *et al.* (2012) encontraram forte correlação entre a atividade da arilsulfatase e o estoque de C no solo. Pandey *et al.* (2014) demonstraram que áreas de vegetação nativa sem manejo apresentaram índices de atividade de arilsulfatase superiores a áreas com manejo do solo. Em contrapartida, Mendes *et al.* (2019) encontraram teores mais elevados de atividade dessa enzima em solos cultivados. Já Rietz e Haynes (2003) ressaltam que a salinidade é um fator limitante para a  $\beta$ -glicosidase. Portanto, irrigações e adubações minerais podem promover danos à atividade dessa enzima.

No tocante a função de armazenar nutrientes (F2), que considera a CTC potencial e a matéria orgânica, os solos dos dois tratamentos apresentaram valores médios (Tabela 18). Ambos os sistemas apresentam valores médios de CTC potencial (SOBRAL *et al.*

2015). Contudo, enquanto o sistema FRN apresentou valor adequado de matéria orgânica, o FCN mostrou-se como médio (SOUSA; LOBATO, 2004). Como nas regiões tropicais a atuação de fatores e processos de formação condicionou, de forma geral, a presença de solos em avançado estágio de intemperismo, todo o sistema é dependente e influenciado pela matéria orgânica do solo. É consenso entre os pesquisadores que este componente pode ser usado como indicador de qualidade de solo (CANELLAS *et al.*, 2005). O teor de matéria orgânica consiste num parâmetro químico essencialmente importante para a comunidade microbiana, pois fornece nutrientes para o crescimento de populações de microrganismos e das plantas (CARNEIRO *et al.*, 2009).

Portanto, os solos dos dois tratamentos apresentaram valores médios das funções de ciclagem (F1) e armazenamento de nutrientes (F2) (Tabela 18). Sendo assim, a situação do solo é considerada estável, mas em uma condição de saúde ou qualidade intermediária, necessitando implementar melhorias no manejo, como, por exemplo, utilização de plantas de cobertura entre as ruas de café. Importante destacar que para essas classificações, os escores da função F3 (suprir nutrientes) não são considerados. Diferentemente de F1 e F2, as quais são interdependentes e influenciadas pelo uso e manejo do solo de forma mais ampla, a F3 está diretamente relacionada ao manejo da adubação e calagem do solo. Por exemplo, adubar e corrigir um solo com F1 e F2 baixas não o torna saudável; ou ainda, um solo ácido e pobre em nutrientes não é necessariamente um solo doente. Portanto, é possível que um solo apresente alta fertilidade química (F3 elevada) e mesmo assim apresente-se doente, do ponto de vista biológico, em função de práticas de manejo inadequadas (MENDES *et al.*, 2021).

Neste sentido, no tocante à parte mineral, o sistema FRN foi classificado como médio em relação à função de suprimento de nutrientes (F3), enquanto o sistema FCN classificou-se como F3 baixo (MENDES *et al.*, 2018). Ambos apresentam altos valores de potássio, adequados valores de alumínio e teores muito baixos de fósforo disponível, mesmo com os altos teores de fósforo total da análise de solo inicial. O sistema FRN demonstrou, porém, melhores teores de magnésio e mais altos valores de pH e saturação por bases (SOUSA; LOBATO, 2004; SOBRAL *et al.* 2015).

No sistema FRN, os teores adequados de magnésio e matéria orgânica do solo (SOUSA; LOBATO, 2004) refletem o uso do composto orgânico, que possui calcário em sua receita (HÖFIG *et al.* 2022). Os teores baixos de pH e saturação por bases do sistema FCN são consequência do uso do fertilizante nitrogenado ureia, pois ela libera, na sua reação com o solo, íons  $H^+$  (LANGUE *et al.*, 2006). A saturação por bases do solo

do sistema FRN o caracteriza como eutrófico, o que pode ser interpretado como solo fértil e reflete na sua maior CTC efetiva. Por outro lado, no sistema FCN, o solo é classificado como distrófico, o que revela que apenas uma menor parte de sua CTC potencial é ocupada por bases (RONQUIM, 2010).

Os dois tratamentos apresentem altos teores de potássio. Isso indica que o aproveitamento de  $K_2O$  entre o cloreto de potássio e o composto orgânico pode ser semelhante, mesmo com a lixiviação existente no  $K_2O$  do cloreto de potássio (GOMES *et al.*, 2022) e mesmo que parte do potássio existente no composto seja retido pela mineralogia do pó de rocha (HÖFIG *et al.*, 2023b).

No tocante ao fósforo disponível, mesmo que as substâncias húmicas aumentem a liberação de fósforo no solo (BEZERRA; SOUSA, 2023), não houve diferença para o teste a 5% de nível de significância entre os tratamentos. Partelli *et al.* (2009) concluíram que a adição de resíduos vegetais e adubos fosfatados naturais no solo do cafeeiro orgânico proporcionam o aumento de fósforo disponível no solo, já que a presença de matéria orgânica gera maior disponibilidade de fósforo e menor fixação do fósforo aplicado. Alguns estudos apontam ainda o aumento de fósforo disponível em áreas com o uso de remineralizadores (ALMEIDA *et al.* 2018; RODRIGUES *et al.* 2021), devido ao aumento do pH e a entrada de óxido de silício no sistema, que compete com os sítios de adsorção do fosfato (ALLEONI *et al.*, 2019, CARVALHO *et al.*, 2001; CORNELL; SCHWERTMANN, 2001; MATICHENKOV; BOCHARNIKOVA, 1996; SANTOS *et al.*, 2021). No entanto, nem mesmo o teor de P total apresentou diferença significativa entre os tratamentos.

Neste contexto, os sistemas FRN e FCN apresentaram IQSs biológico e químico médios. No mesmo sentido, o IQS FertBio de ambos tratamentos foi classificado como médio, mas a função de suprimento de nutrientes foi melhor classificada no sistema FRN.

### 3.2 PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DA BEBIDA

Não houve diferença entre os tratamentos para o teste a 5% de nível de significância para a medida de litros de café cereja/planta. Contudo, para a média de total colhida em área total, o sistema FRN apresentou maior produtividade de café descascado, com 16 sacas/ha, necessitando de 570 litros de café cereja para produzir um saco de 60 kg de café limpo, enquanto o sistema FCN produziu 13,1 sacas/ha, precisando de 622 litros de café cereja para produzir um saco de 60 kg de café descascado. Em relação ao rendimento de café seco em coco para transformar em café limpo, o sistema FRN alcançou 49,32%, enquanto o FCN alcançou 48,35% (Tabela 19). Ressalta-se que a geada ocorrida no dia 18 de maio de 2022 afetou a florada da lavoura, interferindo diretamente na produtividade dos dois sistemas de adubação no ano de 2023.

**Tabela 19 - Medidas relacionadas à eficiência de produção dos sistemas FRN (Fontes Regionais de Nutrientes) e FCN (Fontes Convencionais de Nutrientes).**

Sistema		
FRN	FCN	Medida
1,83ns	1,57ns	litros de café cereja/planta
16	13,1	sacas de 60 kg de café beneficiado/ha
49,32	48,35	rendimento de café seco em coco para formar café beneficiado (%)
570	622	litros de café cereja para produzir uma saca de 60 kg de café beneficiado

Legenda: ns (não significativo para o teste a 5% de nível de significância).

Carmo e Magalhães (1999), analisando três propriedades produtoras de café orgânico, na Zona da Mata de Minas Gerais, em comparação com o sistema convencional (baseado em dados médios regionais, fornecidos por instituições atuantes no meio rural), demonstraram que, embora dois dos três sistemas orgânicos tivessem melhor desempenho econômico, todos tiveram menor produtividade de café beneficiado que o sistema convencional. Sarcinelli e Rodriguez (2006) analisaram três sistemas de produção cafeeira na região da Média Mogiana do estado de São Paulo, sendo dois sistemas convencionais e um orgânico, que apresentou menor produtividade, contudo, menor custo de produção e melhor preço de venda. Já Caixeta e Teixeira (2009) estudaram onze propriedades agrícolas, também na Zona da Mata de Minas Gerais, sendo cinco orgânicas e seis convencionais, e constataram que a cafeicultura orgânica apresentou menor índice de dependência de insumos externos, mas também menor produtividade, nitidamente correlacionada com a menor quantidade de uso de fertilizantes NPK. Ressalta-se,

entretanto, que a propriedade com maior produtividade foi a única que proporcionou resultado econômico de lucro negativo.

Já Dias *et al.* (2018) constataram que a adubação com 336 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O derivado de rocha moída rica em glauconita, em dose única, proporcionou produção de grãos semelhantes às da fertilização com 618 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O de KCl, de forma parcelada, e melhor análise sensorial da bebida. O excesso de cloro inibe a atividade da enzima polifenoloxidase (PALHARINI *et al.*, 2015), que está diretamente ligada a qualidade da bebida (CARVALHO *et al.*, 1994; PIMENTA, *et al.*, 1997; MARTINS *et al.*, 2005). Amorim *et al.* (1973) mostraram que a adubação com KCl prejudicou a qualidade da bebida, mas o teor de K no grão não foi correlacionado, o que indica que o cloro contribuiu para esse efeito depressivo. Os mesmos autores mostram que o teor de N nos grãos foi negativamente correlacionado com a qualidade do café.

No presente estudo, em que a única diferença entre os sistemas foi a fertilização, os resultados apresentaram diferenças estatísticas: o café produzido a partir do sistema de adubação FRN alcançou nota média de 81,02 e desvio padrão de 0,5, obtendo, portanto, classificação *premium* ou bebida mole. Já no sistema FCN, a nota média do café produzido foi de 76,83 e o desvio padrão de 0,6, classificado como abaixo de *premium* ou bebida apenas mole. De acordo com Amorim (1978), a qualidade da bebida depende de vários fatores, entre eles a composição química do grão, que é determinada não só geneticamente, mas também por sistema de cultivo, época de colheita, tipo de preparo, armazenamento e torração. Martinez *et al.* (2014) apontam que os nutrientes minerais interferem na qualidade final do café por duas vias: uma direta, por seu papel no metabolismo da planta e acúmulo de compostos químicos desejáveis do ponto de vista do aroma e sabor do café, e outra indireta, por seu papel na produção de compostos que desfavorecem o desenvolvimento microbiano nos grãos. Os mesmos autores reportam a relação inversamente proporcional entre lixiviação de K de exsudatos de grão cru e qualidade de bebida, assim como Malta *et al.* (2005). Mendonça *et al.* (2005) constataram que a composição química dos grãos de café foi influenciada por fatores genéticos, ambientais e culturais, e pelos métodos de colheita, processamento, armazenamento, torra e moagem, que afetam diretamente a qualidade da bebida do café. Em se tratando das condições de manejo, as adubações e o estado nutricional da planta podem influenciar tanto na produção quanto na composição do grão cru e, conseqüentemente, na qualidade da bebida (MARTINEZ *et al.*, 2014).

## 4 CONCLUSÕES

O sistema de adubação com Fontes Regionais de Nutrientes (FRN), quando comparado com o sistema com Fontes Convencionais de Nutrientes (FCN), alcançou melhor resultado na função de suprimento de nutrientes. Para as funções de armazenamento e ciclagem de nutrientes, bem como para o  $IQS_{BIOLÓGICO}$  (Índice de Qualidade Biológica do Solo),  $IQS_{QUÍMICO}$  (Índice de Qualidade Química do Solo) e  $IQS_{FERTBIO}$  (Índice de Qualidade do Solo FertBio), não houve diferença para o teste a 5% de nível de significância.

Não houve diferença estatística entre a produtividade de café dos dois sistemas.

O sistema FRN atingiu melhor qualidade de bebida de café.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um sistema de produção agrícola é o reflexo das concepções e técnicas de manejo do ambiente adotadas pelo agricultor que gerencia esse sistema. A tecnologia não é, em si mesma, objetiva: ela depende de um sistema de pensamento, de um conjunto de valores e de uma visão de mundo.

O uso de Fontes Regionais de Nutrientes (FRN), quando comparado ao uso de fertilizantes solúveis de síntese química, representa menos transporte e dependência dos fluxos de capitais das multinacionais, gerando cadeias de produção mais transparentes e maior segurança em todos os sentidos do termo. Regionalizar e reinserir a economia na sociedade local preserva o meio ambiente (que, em última instância, é a base de toda economia), fortalece a participação e, portanto, a integração regional. A essa lógica se contrapõe a verticalização da produção agrícola utilizando fontes convencionais de nutrientes, que vincula o agricultor exclusivamente à indústria à qual está integrado e, por conseguinte, a mercados distantes e fora de seu controle. Esta forma convencional de uso de nutrientes debilita os laços econômicos do agricultor com seu meio geográfico, isolando-o do contexto social em que vive.

Formas de FRN como o composto orgânico e a rochagem, que se baseiam em ciclos naturais, podem ser mais adequadas do que as fontes de nutrientes solúveis de síntese química para a agricultura em solos altamente intemperizados, como os situados em clima tropical. Partindo deste pressuposto, o presente trabalho examinou a compostagem conjunta de resíduos orgânicos com rochas moídas e sua aplicação em uma lavoura cafeeira.

A constante relação do agricultor com seu material de trabalho é algo que envolve a experiência e a permanente experimentação como pressupostos de desenvolvimento de sua nobre tarefa, não como um ser submisso aos ditames das experimentações de laboratório e às alternativas mercadológicas que oferecem soluções monolíticas e simplistas. O agricultor com autêntica relação com sua terra desenvolve seu trabalho de forma sábia – e o conhecimento por ele produzido constitui, junto com a ciência, uma potente fonte de sabedoria.

Muitas vezes percebemos resultados que não podem ser expressos em números, já que, diferentemente da física e da química, na agricultura os dados numéricos nem sempre constituem a exata realidade, sendo que na natureza não existe uma única causa,

nem uma única consequência ou solução. Como os números traduzem de forma fidedigna o valor de um adubo produzido no campo pela mão humana, a vitalidade de um alimento, as relações entre patrão e empregado, o espírito e o ambiente de uma fazenda? Como medir a qualidade biológica do solo se não conhecemos mais que 1% dos microrganismos que lá vivem? Onde há vida, os números nem sempre podem explicar tudo e sabe-se que o potencial está na diversidade, que traz o equilíbrio dinâmico e saudável.

A compostagem conduzida de forma mecanizada é uma tecnologia intermediária e, como tal, dotada de fisionomia humana, é de ampla aplicabilidade, propícia para um ambiente simples e rudimentar, diferente da tecnologia requintada, e, por isso, a forma com que se monta as leiras e se maneja a compostagem é essencial para seu sucesso. O ato de compostar cria um vínculo do agricultor com o adubo e transforma resíduos orgânicos em um material de fácil armazenagem e manuseio, com características químicas e biológicas que atendem as necessidades agrícolas, potencializando atributos positivos e corrigindo propriedades indesejáveis, como a presença de coliformes, sementes de plantas espontâneas e o extremo calor causado pela decomposição da matéria orgânica crua.

Como agricultores, exercemos nosso compromisso ancestral de compartilhar nossas práticas para evoluirmos. O conjunto dos estudos realizados nessa pesquisa permitiu demonstrar que os compostos produzidos, embora nem sempre tenham atendido todos os parâmetros exigidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), geraram ótimos resultados no aspecto do cafeeiro, o que demonstra sua qualidade e que já é algo perceptível na propriedade agrícola onde foram desenvolvidos os estudos. Em todos os testes realizados, o processo de compostagem aconteceu, caracterizado pela fase termofílica e comprovado nos produtos finais sem coliformes e sem germinação de plantas espontâneas, embora, por opção, a compostagem tenha sido finalizada no início ou antes da fase de maturação. A experiência no processo de compostagem indicou fortemente que mais do que 30% de rochas moídas na compostagem atrapalha seu manejo. A nossa vivência sugere, ainda que, uma vez respeitado o limite máximo de 30%, a proporção adequada de pó de rocha no composto deve ser escolhida de acordo com o objetivo do agricultor, ainda que pareça ser melhor para a compostagem que sempre exista pó de rocha na mistura inicial, pois ele alimenta a vida.

Notou-se, também, que o uso de rochas moídas na compostagem causou diminuição na perda de nitrogênio, e que os microrganismos existentes na leira liberaram

fósforo retido, de tal forma que o teor deste elemento no produto final pode ser maior do que o que existia disponível nas matérias primas. Ademais, observou-se que o aquecimento das leiras, estimulado pela presença de pó de rocha, provocou o biointemperismo dos minerais existentes na própria rocha moída, especialmente cálcio e magnésio na forma de carbonatos e silicatos, assim como parte do potássio existente nos silicatos. Neste sentido, o composto com micaxisto mostrou o maior aproveitamento entre o potássio das matérias primas originais e o adubo final, o que, geralmente, é um indicador de uma melhor relação custo/benefício. Também foi percebido que o uso do calcixisto na compostagem, pelo seu alto teor de cálcio, pode gerar produtos com teor de carbono orgânico menor que o aceito pelo MAPA.

Em nosso campo experimental, na tradagem já se notou a diferença de porosidade entre os solos adubados com FRN e com fertilizantes solúveis de síntese química. O sistema de adubação com FRN, quando comparado com o sistema de adubação convencional, alcançou resultados superiores na função de suprimento de nutrientes e na qualidade de bebida de café. Não houve diferenças estatísticas nos Índices de Qualidade de Solo Biológico, Químico e FertBio, bem como no tocante a funções de ciclagem e armazenamento de nutrientes, além da produtividade de café. É de se ressaltar, porém, que a quantidade de composto utilizado na adubação de colheita pode ser um dificultador operacional e econômico, embora esta análise não tenha sido um objetivo desse trabalho. Contudo, alternativas nesse sentido podem ser buscadas, como, por exemplo, produzir um fertilizante com mais N, ou complementar a adubação com outra fonte de nitrogênio.

É importante destacar que reproduzir soluções sempre comporta um risco, ainda mais em um país tão diverso, em todos sentidos, quanto o Brasil. Essencial é o aprendizado de conceitos e fatos importantes, possuindo a habilidade de adaptá-los para cada situação, entendendo a agricultura como a ciência das condições locais. O manejo depende basicamente do agricultor e das condições ecológicas da sua atividade, determinando um estudo complexo, particular e pouco sujeito a generalizações. É o agricultor que entende sua propriedade e é ele que diariamente entra em contato com as forças da natureza que comandam a dinâmica do agroecossistema. Com isso, determinado manejo pode ou não ter resultado em função da relação entre a experiência do agricultor e a previsão científica, não se enquadrando em qualquer tipo de pacote tecnológico.

Sendo assim, o segredo da agricultura não está no químico ou no orgânico: está na combinação de todos os manejos necessários à manutenção da vida, de tal forma que o agricultor tenha autonomia e tenha seu território sob sua tutela. O uso de composto

orgânico enriquecido com pó de rocha é uma das técnicas possíveis para se alcançar parte desse objetivo. Produzir seu próprio adubo é um ato de resistência contra o gradativo processo de desapropriação dos agricultores que nos transforma em meros apêndices da indústria.

Neste sentido, é essencial que se busque a reconexão com a natureza, aplicando-se práticas regenerativas à produção de alimentos. Quando os efeitos dessa transição começam a ser vividos, vamos nos sentindo mais em casa, nos enxergando dentro do todo, nos afastando de uma visão analítica e fragmentada em relação ao ecossistema.

É um grande privilégio produzir alimentos e, por meio da agricultura, interagir com a natureza. Na colheita, recolhem-se os frutos e o saber que essa relação propicia. Sendo assim, a agricultura é mais do que um ofício exercido visando-se unicamente o lucro imediato.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID, N.; SAYAD, S. Detrimental effects of olive mill wastewater on the composting process for agricultural wastes. **Waste Manage**, n. 26, p. 1099-1107, 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014a.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.

ABREU JUNIOR, C.H.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J.C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: Propriedades químicas do solo e produção vegetal. In: TORRADO, P.V.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, E.J., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v.4. p.391-470.

ALCARDE, J.C. **Manual de análise de fertilizantes**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiróz”, 2009, 259p.

ALLEONI, L.R.F.; MELLO, J.W.V.; ROCHA, W.S.D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1381. 2019.

ALMEIDA JUNIOR, A. R. A planta desfigurada. Crítica das representações da planta como máquina química e como mercadoria. São Paulo, 1995, 447 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, L. H. C. de; KLEIN, P. H.; OLIVEIRA, E. C.; MIGLIORANZA, E. Silício e disponibilidade de fósforo no crescimento e desenvolvimento de mudas de café. **Revista Cultura Agrônômica**, v. 26, p. 123-131.

ALTIERI, M. A. **Biotecnologia agrícola: mitos, riscos ambientais e alternativas**. Porto Alegre: ASCAR-EMATER/RS, 2002.

ALTIERI, M.A., NICHOLLS, C.I., HENAO, A.; LANA, M. A. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. **Agron. Sustain. Dev.** 35, 869–890, 2015.

AMORIM, V. H.; SILVA, D. M. (1968) Relationships between the polyphenol oxidase activity of coffee beans and the quality of the beverage. **Nature**, 219:381-382.

AMORIM, V. H.; TEIXEIRA, A. A.; MORAES, R. S.; REIS, A. J.; GOMES, F. P.; MALAVOLTA, E. Estudos sobre a alimentação mineral do cafeeiro XXVII. Efeito da adubação N, P e K no teor de macro e micro nutrientes do fruto e na qualidade da bebida do café. **Anais da E. S. A. Luíz de Queiroz**, v. 30, 1973.

ANDA- Associação Nacional para Difusão de Adubos – Principais indicadores do setor de fertilizantes. [www.anda.org.br](http://www.anda.org.br). Disponível em [Principais Indicadores 2022.xlsx \(anda.org.br\)](#). Acesso em 19 de junho de 2023.

ANDA, M.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Improving chemical proprieties of a highly weathered soil using finely ground basalt rock. *Catena*, 124, 147-161. 2015.

ANDREOLI, C.V. et al. Higienizacao do Lodo de Esgoto – Residuos solidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposicao final. In: Andreoli, C. V. **Lodo de Esgoto**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

AQUINO, F. T. **Estudo do processo de compostagem de resíduos sólidos domésticos: identificação e quantificação de ácidos orgânicos**. 2003. 64 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, Araraquara, 2003.

AULER, A. C; VIEIRA, M. L. Coleta de amostras indeformadas de solo: avaliação e proposta de equipamento. *Unoesc & Ciência*, Joaçaba, v. 8, n. 1, p. 41-44, jun. 2017.

ARAÚJO, J. B. da S.; MORELI, A. P. Composto de pilha estático não triturado na montagem, umedecido com bananeiras. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil (5.: Águas de Lindóia, SP: 2007). *Anais*. Brasília, DF. Embrapa - Café, 2007. (1 CD-ROM), 4 p.

ARAÚJO, M. das G. C. de. **Controle microbiológico e atividade enzimática em compostagem de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

ASSIS, R. L. de; AREZZO, D. C. de; ALMEIDA, D. L. de; DE-POLLI, H. Aspectos Sócio-econômicos da Agricultura Orgânica na Estado do Rio de Janeiro. *Revista de Administração Pública*, Rio de Janeiro, v.30, n.1, p.26-42, 1996.

ASSIS, R. L.; ROMEIRO, A. R. Agroecologia e agricultura orgânica: controvérsias e tendências, *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, n. 6, p. 67-80, jul./dez., 2002.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 14<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 350 p.

BADR, M. A. Efficiency of K-feldspar Combined with Organic Materials and Silicate Dissolving Bacteria on Tomato Yield M.A. *Journal of Applied Sciences Research*, 2(12): 1191-1198, 2006

BAMBERG, A. L; MARTINAZZO, R.; SILVEIRA, C. A. P.; PILON, C. N.; STUMPF, L.; BERGMANN, M.; STRAATEN, P. van; MARTINS, E. de S. Soil Fertilization and Maize-Wheat Grain Production with Alternative Sources of Nutrients, PREPRINT (Version 1) available at **Research Square**, 2023 [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2406512/v1>]

BASAK, B. B.; RAY, P.; BISWAS, D. R. Emerging threat of potassium mining in Indian soils: Harnessing the potential of low-grade mica minerals through microbial intervention. In: **Biofertilizers**. Woodhead Publishing, 2021. p. 289-299.

BASAK, B.B.; SARKAR, B.; NAIDU, R. Environmentally safe release of plant available potassium and micronutrients from organically amended rock mineral powder. *Environ Geochem Health*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00677-1>

BASAVALINGAIAH, K.; PARAMESH, V.; PARAJULI, R.; GIRISHA, H.; SHIVAPRASAD, M.; VIDYASHREE, G.; THOMA, G.; HANUMANTHAPPA, M.; YOGESH, G.; MISRA, S.D. Energy flow and life cycle impact assessment of coffee-pepper production systems: An evaluation of conventional, integrated and organic farms in India. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 92, n.106687, 2021.

BENITES, V. M., CAETANO, J. O, FERREIRA FILHO, W. C.; MENEZES, C. C. E.; POLIDORO, J. C.; OLIVEIRA, R. P.; WIENDL, T. Influence of brachiaria (*Urochloa brizantha*) as a winter cover crop on potassium use efficiency and soybean yield under no-till in the Brazilian Cerrado. **The Electronic International Fertilizer Correspondent (e-ifc)**, n. 39, p. 24-35, Dec. 2014.

BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. de A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.

BEERLING, D. J., KANTZAS, E. P., LOMAS, M. R., WADE, P., EUFRASIO, R. M., RENFORTH, P.; SARKAR, B.; ANDREWS, M. G.; JAMES, R. H.; PEARCE, C. R.; MERCURE, J. F.; POLLITT, H.; HOLDEN, P. B.; EDWARDS, N. R.; KHANNA, M.; KOH, L.; QUEGAN, S.; PDGEON, N. F.; JANSSENS, I. A.; HANSEN, J. Banwart, S. A. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. **Nature**, 583(7815), p. 242–248, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>

BEERLING, D. J., LEAKE, J. R., LONG, S. P., SCHOLES, J. D., TON, J., NELSON, P. N., BIRD, M.; KANTZAS, E. TAYLOR, L. L.; SARKAR, B.; KELLAND, M. LUCIA, E de; KANTOLA, I.; MÜLLER, C.; RAU, G. H.; Hansen, J. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security perspective. **Nature Plants**, 4(3), p. 138–147, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>

BERNAL, M. P.; NAVARRO, A. F.; ROIG, A.; CEGARRA, J.; GARCIA, D. E. Carbon and nitrogen transformations during composting of sweet sorghum bagasse. **Biology and Fertility Soils**. v.22, p.141-148, 1996.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J.C.; AMARAL, A.J. Aspectos financeiros relaciona- dos às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. *Revista Bra- sileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 133-142, 2007.

BERTON, R. S.; CHIBA, M. K.; COSCIONE, A. R., ABREU, M. F. da; NASCIMENTO, A. L. **Compostagem para fins agrícolas**. Campinas/SP: Instituto Agrônômico de Campinas, 2021. 116 p.

- BEZERRA, P. S. S.; SOUSA, B. A. Fontes fosfatadas e substâncias húmicas na disponibilidade de fósforo em neossolo e argissolo. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, 2023.
- BIANCHET, R. T.; PROVIN, A. P.; GARCIA, G. D.; CUBAS, A. L. V.; DUTRA, R. de A.; MAGNAGO, R. F. Produção de briquetes utilizando resíduos agrícolas da laranja e borra do café. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis v. 9, n. 3, 2020.
- BOFF, L. **Ecologia: grito da terra, gritos dos pobres**. São Paulo: Ática, 1995.
- BONFIM, F. P. G.; HONÓRIO, I. C. G.; REIS, I. L.; PEREIRA, A. de J.; SOUZA, D. B. de. **Caderno dos Micro-organismos Eficientes (EM):** Instruções práticas sobre o uso ecológico e social do EM. 2. Ed. Viçosa: 2011. 32 p.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; CONTE, O. OLIVEIRA, E. S.; LEVIEN, R.; Equipamento para coleta de amostras indeformadas de solo para estudos em condições controladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1929-1934, nov./dez. 2009.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elements of the nature and properties of soils**. New Jersey: Pearson Education, 2010
- BRASIL. (2013). **Lei Nº 12.890**. Altera a Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Publicado no DOU em 11 de dezembro de 2013.
- BRASIL. **Mapa geológico**, escala 1:250.000 da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno. ZEE, Fase I, Consórcio ZEE RIDE, CPRM, 2002.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos/** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA, 2017. 240 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 481, de 3 de Outubro de 2017**. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=728>
- BRASIL. **Zoneamento agrogeológico do Brasil, escala 1:1.000.000**. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/impressao/pdf/zag181205.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2020.
- BRITO, L. M.; MOURA, I.; RODRIGUES, R., COUTINHO, J. 2017. Lettuce and cabbage growth and nutrient uptake response to invasive Acacia waste composts. **Acta Hort.** 1168, 39– 46. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1168.6>

BROOKES, P.C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of Soils**, v. 19, p. 269-279, 1995.

BUIANAIN, A. M.; FAVARETO, A.; CONTINI, E.; CHAVES, F. T.; HENZ, G. P.; GARCIA, J. R.; DAMIANI, O.; VIEIRA, P. A.; GRUNDLING, R. D. P.; NOGUEIRA, V. G. de C. **Desafios para a agricultura nos biomas brasileiros**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 69 p.

BURBANO, D. F. M.; THEODORO, S. H.; CARVALHO, A. X. M.; RAMOS, C. G. Crushed volcanic rock as soil remineralizer: a strategy to overcome the global fertilizer crisis. *Natural Resources Research*, v. 31, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10107-x>

CABAÑAS-VARGAS, Dulce D. et al. Assessing the stability and maturity of compost at large-scale plants. **Ingeniería Revista Académica**, Yucatán, v. 9, n. 2, p. 25-30, 2005.

CAIXETA, G. Z. T.; TEIXEIRA, S. M. Economicidade e certificação da cafeicultura familiar na Zona da Mata de Minas Gerais. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 39, n. 4, p. 317-329, out./dez. 2009

CANELLAS, L. P.; BUSATO, J. G.; CAUME, D. J. O uso e manejo da matéria orgânica humificada soba perspectiva da Agroecologia. In: CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A. (org.). **Humosfera**: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas. Campo dos Goytacazes: L. P. Canellas. G. A. Santos, 2005.

CAMPBELL, N. S. **The use of rockdust and composted materials as soil fertility amendments**. 2009. 402 f. Ph.D. thesis submitted to the Faculty of Physical Sciences, Department of Chemistry, University of Glasgow, 2009.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

CANTÚ, R. R.; MORALES, R. G. F.; SCHALLENBERGER, E.; VISCONTI, A. **Compostagem**: estratégias para transformar resíduos em fertilizante. Florianópolis: EPAGRI/DEMC, 2022. 21 p.

CARMO M. S.; MAGALHÃES M. M. (1999) Agricultura sustentável: avaliação da eficiência técnica e econômica de atividades agropecuárias selecionadas no sistema não convencional de produção. **Informações Econômicas**: 29(7):7-98.

CARNEIRO, M.A.C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CARNEIRO, M. A. C. Características bioquímicas do solo em duas cronossequências de reabilitação em áreas de mineração de bauxita. 2009. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

CARVALHO, A. M. X. Rochagem: um novo desafio para o manejo sustentável da fertilidade do solo. In: SILVA, J. C.; SILVA, A. A. S.; ASSIS, R. T. (Eds.). **Sustentabilidade e Inovações no Campo**. Uberlândia: Comoser. 2013.117–132.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E.; SANTOS, C.D.; FERNANDES, L.A.; CURI, N.; RODRIGUES, D.C. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 557-565, mar. 2001.

CARVALHO, V. D. de; CHAGAS, S. J. de R.; CHALFOUN, S. M.; JUSTE-JUNIOR, E. S. G. Relação entre a composição físico-química e química do grão beneficiado e a qualidade de bebida do café 1 - Atividades de polifenoloxidase e peroxidase, índice de coloração de acidez. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 3, 1994.

CARVALHO, V. L. de; CUNHA, R. L. da; SILVA, N. R. N. Alternativas de controle de doenças do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 42-49, jan./abr. 2012.

CAUME, D. J. **A construção social de um outro ofício de agricultor**: as estratégias tecnológicas de reprodução social do campesinato. Porto Alegre, Dissertação de Mestrado em Sociologia, UFRGS, 1992.

CAVALCANTI, C. Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 65, 2010.

CAVALCANTI, C. Sustentabilidade: mantra ou escolha moral? Uma abordagem ecológico-econômica. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74: 2012.

CEGARRA, J.L., HERNÁNDEZ, M.T.; LAX, A.; COSTA, F. Adición de residuos vegetales a suelos calizos: influencia sobre la capacidad de cambio catiónico. **An. Edafol. Agrobiol.**, v. 42, p. 235-244, 1983.

CERRI, C.C.; ANDREUX, F.; EDUARDO, B.P. O ciclo do carbono no solo. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, p.73-90, 1992.

CHABOUSSOU, F. **Plantas doentes pelo uso de agrotóxicos**: novas bases de uma prevenção contra doenças e parasitas: a teoria da trofobioso. São Paulo: Expressão Popular, 2006. 320 p.

CHAVES, L. H. G.; LIBARDI, P.L. Lixiviação de potássio e cálcio mais magnésio influenciada pelo pH. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 19, p. 145-148, 1995.

CHEN, B., LIU, E., TIAN, Q. *et al.* Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. **Agron. Sustain. Dev.** 34, 429–442 (2014). <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0207-8>

CHESWORTH, W.; VAN STRAATEN, P.; SEMOKA, J. M. R. Agrogeology in East Africa: the Tanzania-Canada project, **Journal of African Earth Sciences**, vol. 9, n. 2, pp. 357-362, dez.1989

- CHO, Y. **Agricultura orgânica JADAM**: o caminho para uma agricultura de ultrabaixo custo. Yuseonggu, Daejon, República da Coréia: JADAM, 2018.
- CLEMENT, C.R. 1492 and the loss of Amazonian crop genetic resources. I. The relation between domestication and human population decline. **Economic Botany**, 53(2):188-202. 1999
- COELHO, M. J. H. **Café do Brasil**: o sabor amargo da crise. Florianópolis: Oxfam, 2002. 58 p.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFMSG - **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais** -Viçosa - 1999 - 359 p
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café**, Brasília, DF, v. 8, safra 2021, n. 1, primeiro levantamento, jan. 2021.
- COOPER, M.; ZANON, A. R.; REIA, M. Y.; MORATO, R. W. **Compostagem e reaproveitamento de resíduos orgânicos agroindustriais**: teórico e prático. Piracicaba: ESALQ – Divisão de Biblioteca, 2010.
- CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: Structure, properties, reaction, occurrence and uses. VHC Publishers, New York, 1996, 573p.
- COSTA, M. B. B. da. **Agroecologia no Brasil**: histórias, princípios e práticas. São Paulo: Expressão Popular, 2017. 144 p.
- COTTA, J. A. de O. CARVALHO, N. L. C.; BRUM, T. da S.; REZENDE, M.O. de O. Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 65-78, Mar. 2015 .
- COUTO-JÚNIOR, A. A.; CONCEIÇÃO, F. T.; FERNANDES, A. M.; CUNHA, C.; SPATTI-JÚNIOR, E. P. Geoquímica fluvial aplicada à avaliação das taxas de intemperismo químico e remoção de solo da formação rio claro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, p. 451-464, 2016.
- CRUZ, André Camargo; PEREIRA, Felipe dos Santos; FIGUEIREDO, Vinicius Samu de. **Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio**: avaliação do potencial econômico brasileiro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 45, p. [137]-187, mar. 2017.
- CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 71-92.

CURTIS, J. C. D.; LUCHESE, A. V.; MISSIO, R. F. Evaluation of microbial activity, N-NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> losses in poultry litter treated with basalt rock powder. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture** (2023)12: 25-35.

DAL BOSCO, Tatiane Cristina; GONÇALVES, Flávia; ANDRADE, Francine Conceição de; TAIATELE JUNIOR, Ivan; SILVA, Jaqueline dos Santos; SBIZZARO, Mariana; "Contextualização teórica: compostagem e vermicompostagem", p. 19 -44. In: **Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos: resultados de pesquisas acadêmicas**. São Paulo: Blucher, 2017.

DALMORA, A. C., RAMOS, C. G., PLATA, L. G., da COSTA, M. L., KAUTZMANN, R. M., OLIVEIRA, L. F. S. 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, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136240>

DAVIS, A. P.; GOVAERTS, R.; BRIDSON, D. M.; STOFFELEN, P. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (*Rubiaceae*). **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, v. 152, n. 4, p. 465-512, Dec. 2006.

DEON, M.; MATTIAS. J.L; NESI, C.N.; KOLLING, D.F. Avaliação da qualidade de composto orgânico na Universidade Comunitária Regional de Chapecó. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, p. 1441- 1444, 2007.

DIAS, H. B.; AZEVEDO, A. C. de; IEDA, J. J. C. (Julho, 28-31). pH de abrasão com índice de alteração de basalto. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, *Anais eletrônicos* [Anais]. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Florianópolis, Brasil.

DIAS, K. G. de L.; GUIMARÃES, P. T. G.; do CARMO, D. L.; Reis, T. H. P.; LACERDA, J. J. de J. Alternative sources of potassium in coffee plants for better soil fertility, productivity, and beverage quality. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53(12), p. 1355–1362, 2018. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001200008>

DICK, R.P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J.V. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA; American Society of Agriculture, 1994. p. 107-124.

DICK, W. A.; McCOY, E. L. Enhancing soil fertility by addition of compost. In: HOITINK, H. A. J.; KEENER, H. M. (ed.). **Science and engineering of composting: design, environmental, microbial and utilization aspects**. Wooster, Ohio: The Ohio State University, 1993. p. 622-44.

DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Significance and potential uses of soil enzymes. In: METTING JUNIOR, F.B. (Ed.). **Soil microbial ecology applications in agricultural and environmental management**. New York: M. Dekker, 1993. p.95-127.

DÖBEREINER, J.; BALDANI, V. L. D.; BALDANI, J. I. **Como isolar e identificar bactérias diazotróficas de plantas não leguminosas**. Brasília: Embrapa SPI, 1995. 60p.

DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v.15, n.1, p.3-11, Jan. 2000.

EHLERS, E. **Agricultura Sustentável: Origens e perspectivas de um novo paradigma**. São Paulo: Livros da Terra, 1996. 178p.

EHLERS, E. A Agricultura Alternativa: Uma visão histórica. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v.24, n. especial, p.231-262, 1994.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Amostragem de solo**. Manus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2005.

EPSTEIN, E. **The Science of Composting**. Florida, USA: CRC Press LLC, p. 502, 1997.

ERTHAL, E. S.; ZAMBERLAN, J. F.; SALAZAR, R. F. dos S. A batata-doce (ipomoea batatas) como biomassa alternativa para produção de biocombustíveis frente aos combustíveis fósseis. **Ciência & Tecnologia**, v. 2, n. 1, 2018.

ETESAMI, H.; EMAMI, S.; ALIKHANI, H. A. Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects A review. **J. Soil Sci. Plant Nutr.**, Temuco, v. 17, n. 4, p. 897-911, Dec. 2017

ESPÍNDOLA, J.A.A.; GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L. de. **Adubação verde: Estratégia para uma agricultura sustentável**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 1997. 20p. (Embrapa-CNPAB. Documentos, 42).

FEIDEN, A. **Conceitos e Princípios para o Manejo Ecológico do Solo**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, dez. 2001. 21 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 140).

FERNANDES, A. M.; CONCEIÇÃO, F. T. da; SPATTI-JÚNIOR, E. P.; COUTO-JÚNIOR, A. A.; MORTATTI, J. Modelagem do controle climático nas taxas de erosão mecânica e de intemperismo químico na bacia do Rio Sorocaba (SP). **Geochimica Brasiliensis** 33(1): 50 -63, 2019

FERNANDES, A. N.; GIOVANELA, M.; SORIANO-SIERRA, E. J.; SIERRA, M. M. D. Acidity data on humic substances from distinct environments: methodology considerations. **Journal of Coastal Research**, 39(1), 1062-1065, 2006.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. Rio de Janeiro: ABES, 79p. 1999.

FERRALSOL, L. F. dos S.; SODRÉ, F. F.; MARTINS, E. de S.; FIGUEIREDO, C. C. de; BUSATO, J. G. Effects of biotite syenite on the nutrient levels and electrical charges in a Brazilian Savanna, **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 51, e66691, 2021.

FIALHO, L. L.; SILVA, W. T. L.; SIMOES, M. L.; MILORI, D. M. P.; MARTIN NETO, L. Monitoramento do processo de compostagem por Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE) e relação C/N. In: 29ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 2006, Águas de Lindóia, 1999.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise de qualidade ambiental**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 196 p.

FONG, M., J.W.C. WONG; WONG, M. H. Review on evaluation of compost maturity and stability of solid waste. **Shanghai Environ. Sci.**, v.18, p. 91-93, 1999.

FOSTER, J. B.; CLARK, B. The robbery of nature: capitalism and the metabolic rift. **Monthly Review Archives**, v. 70, p. 1-20, 2018.

FRANCO, J. B. S. O papel da Embrapa nas transformações do Cerrado. **Caminhos de Geografia**, v. 2, n. 3, p. 31-40, jun. 2001.

FRANCOU, C.; POITRENAUD, M.; HOUOT, S. Stabilization of organic matter during composting: influence of process and feedstocks. **Compost. Sci. Util.**, v. 13, p. 72-83, 2005.

FYFE, W. S.; LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution, **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 715-720, 2006.

GARCIA-GOMEZ, A.; BERNAL, M. P.; ROIG, A. Organic matter fractions involved in degradation and humification processes during composting. **Compost. Sci. Util.**, v. 13, p. 127-135, 2005.

GARCIA-GOMEZ, A.; SZMIDT, R.A.K.; ROING, A. Enhancing of the composting rate of spent mushroom substrate by Rock Dust. **Compost Science & Utilization**. 10, 99-104, 2002.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa**. 6. ed. São Paulos: Atlas, 2008. 200p.

GILL, J.C. Geology and the Sustainable Development Goals. **Episodes**, 40(1), p. 70–76, 2017. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2017/v40i1/017010>

GLIESMANN, S. R. **Agroecologia**. Processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: UFRGS, 2000. 653 p.

GOEDERT, W. J. Região dos Cerrados: potencial agrícola e política para seu desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 24, n. 1, p. 1-17, jan. 1989.

GOMES-CASSERES, B.; MCQUADE, K. **Hoechst and the German chemical industry**. Boston: Harvard Business School, 1991.

GOMES, M. de P.; REZENDE, C. H. S.; SOUZA, J. A.; ROCHA, G. C. . Lixiviação de potássio em um latossolo cultivado com café. **IRRIGA**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 597–606, 2022. DOI: 10.15809/irriga.2022v27n3p597-606. Disponível em: <https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4143>. Acesso em: 29 mar. 2023.

GÓMEZ-BRANDÓN, M.; LAZCANO, C.; DOMÍNGUEZ, J. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. **Chemosphere**, v. 70, n. 3, p. 436-444, 2008.

GRAHAM, J. **Investigation into the composting of poultry carcasses and the use of rockdust as a compost enhancer**. BSc thesis. University of Glasgow, 2001.

GRANT, W. H. **Abrasion pH, an index of chemical weathering**. *Clays and Clay Minerals*, 17:151-155, 1969.

HAFEZ, A. A. R. Comparative changes in soil-physical properties induced by admixture of manure from various domestic animals. **Soil Science**. v. 118, p. 53-59, 1974.

HALLER, H. **Efficacy, sustainability and diffusion potential of rock dust for soil remediation in Chontales, Nicaragua**. 2011. 38 f. Mid Sweden University, Faculty of Science, Technology and Media, Department of Engineering and Sustainable Development, 2011.

HARLEY, A. D.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: A geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 56(1), p. 11–36, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; CRUSE, R. M. Soil: the forgotten piece of the water, food, energy nexus. **Advances in Agronomy**, v. 143, p. 1-46, 2017.

HAYNES, R.J. The decomposition process: Mineralization, immobilization, humus formation and degradation. In: HAYNES, R.J., ed. **Mineral nitrogen in the plant soil system**. Orlando: Academic Press, 1986. p.52-176.

HECK, K; MARCO, E. G. de; HAHN, A. B. B.; KLUGE, M.; SPILKI, F. R.; SAND, S. T. V. D. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.17, n.1, p. 54–59, 2013.

HELFRICH, P. *et al.* A novel method for determining phytotoxicity in composts. **Compost science & utilization**, v.6, n.3, p. 6-13,1998.

HENSEL, J. **Pães de pedra: Brot aus Steinen, durch mineralische Düngung der Felder**. Canoas: Salles, 1898. 79 p.

HINSINGER, P.; ELSASS, F.; JAILLARD, B.; ROBERT, M. Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in the rhizosphere of rape. **Journal of Soil Science**, 44(3), p. 535–545, 1993. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00475.x>

HINSINGER, P.; FERNANDES BARROS, O. N.; BENEDETTI, M. F.; NOACK, Y.; CALLOT, G. Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(1), p. 137–152, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00524-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00524-X)

HOFFMANN, L. V. Biologia molecular da fixação biológica do nitrogênio. In: SILVEIRA, A. P. D. da; FREITAS, S. dos. **S. Microbiota do solo e qualidade ambiental**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2007. 312 p.

HÖFIG, P.; MARTINS, E. de S., BROETTO, T.; GIASSON, E.; ARANTES, B. S. Efeitos de diferentes proporções de rochas moídas no processo de compostagem. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 18, n. 3, p. 133-153, 2023a.

HÖFIG, P.; MARTINS, E. de S.; BROETTO, T.; GIASSON, E.; SILVA, G. M. F. da. Avaliação da qualidade de um fertilizante produzido por compostagem conjunta de materiais orgânicos e rochas moídas, **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA** ISSN 2176-9168 (On-line), v. 15, n. 3, 2022.

HÖFIG, P.; MARTINS, Eder de S.; GIASSON, E.; ARANTES, B. S. Diferentes rochas moídas no processo de compostagem em Unai/MG: fertilizante orgânico e autonomia agrícola. **Geographia Opportuno Tempore**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. e47425, 2023b. DOI: 10.5433/got.2023.v.9.47425. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/Geographia/article/view/47425>. Acesso em: 29 mar. 2023.

HÖFIG, P.; GIASSON, E. Levantamento de reconhecimento dos solos da Fazenda Ouro Verde, Unai/MG. 2015.

HOWARD, A. **Um testamento agrícola**. São Paulo: Expressão Popular, 2007. 360 p.

IBA – INSTITUTO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA. **8 Benefícios da adubação orgânica**: adubo orgânico sim... mas com ciência! *E-book*: IBA, 2020. 31 p.

IBGE. - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **A Geografia do Café**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. 136 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Base contínua ao milionésimo. Disponível em: [<ftp://geofpt.ibge.gov.br/mapeamento\\_sistematico/base\\_continua\\_ao\\_milionesimo/>](ftp://geofpt.ibge.gov.br/mapeamento_sistematico/base_continua_ao_milionesimo/) Acesso em: 04 nov. 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão de Águas. PN1 CBH Alto Paranaíba. Disponível em <<http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais-mg/pn1-cbh-alto-rio-paranaiba>> Acesso em: 01 mar. 2020.

IGLESIAS-JIMENEZ, E.; PEREZ-GARCIA, V. Determination of maturity índices for city refuse composts. **Agr. Ecosyst. Environ.**, v. 38: p. 331-343, 1992.

ILCHENKO, O.V.; GUIMARÃES, D. **Sobre a possibilidade de utilização agrícola dos sienitos nefelínicos do planalto de Poços de Caldas, Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Instituto de Tecnologia Industrial, 15p. 1953 (Avulso, 15).

INÁCIO, C. de T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem**: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Embrapa Solos: Rio de Janeiro, 2009. 154 p.

ISHIMURA, I.; YAMAMOTO, S. M.; SANTOS, C. dos; OLIVEIRA, M. A. de. **Olericultura orgânica**: compostagem. São Paulo: SENAR/SP, 2006. 4 p.

JAHNEL, M. C.; MELLONI, R.; CARDOSO, E. J. B. N. Maturidade de composto de lixo urbano. **Sci. agric.**, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 301-304, 1999.

JESUS, E. L. de. Histórico e filosofia da agricultura alternativa. **Revista Proposta Fase**, Rio de Janeiro, v.27, p.34-40, 1985

JIMENEZ, E.I; GARCIA, V.P. Evaluation of City Refuse Compost Maturity: a review. **Biological Wastes**, n 27, p. 115-142, 1989.

JIMENEZ-GÓMEZ, S. **Fertilizantes de Liberación Lenta**. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. 146p.

JODICE, R. Parametri chimici e biologici per la valutazione della qualità del compost. In: **Proceedings of the COMPOST Production and Use International Symposium**, S. Michelle all'Adige, n. 20- 23, v June, p. 363-384, 1989.

JONES, D. L. et al. Assessing the addition of mineral processing waste to green waste-derived compost: An agronomic, environmental and economic appraisal. **Bioresource technology**, v. 100, n. 2, p. 770-777, 2009.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, R. F (eds.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009.

KASANA, R. C.; SALWAN, R.; DHAR, H.; DUTT, S.; GULATI, A. A rapid and easy method for the detection of microbial celulases on agar plates using gram`s iodine. **Current Microbiology**, London, v. 57, p. 503-507, 2008.

KAYHANIAN, M. TCHOBANOGLOUS, G. Innovative two-stage process for the recovery of energy and compost from the organic fraction of municipal solid waste (MSW), **Water Sc. Technol.**, 27, p. 133-143, 1993.

KATTOOF, S. F.; EL-GHAMRY; FOUUDA, K. F.; EL-EZZ, F. A. Organic Fertilizers Derived from Farm By-Products for Sustainable Agriculture. – A Review. **J. of Soil Sciences and Agricultural Engineering**, Mansoura Univ., Vol 10 (12), p. 815-819, 2019

KHATOUNIAN, Carlos, A. **A reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Agroecológica. 2001. 348p.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Editora Agronômica Ceres Ltda: Piracicaba, 1985. 492 p.

KIEHL, E.J. **Manual de compostagem**: maturação e qualidade do composto. 4ª ed. E. J. Kiehl: Piracicaba, 2004. 173 p.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 2. ed. Passo Fundo: UPF, 2012. 240 p.

KOEPEF, H. H.; PETTERSSON, B. D.; SCHAUMANN, W. **Agricultura biodinâmica**. São Paulo: Nobel, 1983.

KO, Han, J.; KIM, Ki, Y.; KIM, Hyeon, T.; KIM, Chi, N.; UMEDA, M. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contentes in composts made from animal manure. **Waste Management**, v. 28, n. 5, p. 813-820, 2008.

KOLLER, O. C. Adubação de pomares de citros. In: CICLO DE PALESTRAS SOBRE CITRICULTURA DO RS, 12., 2005, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS: Emater/RS: Fepagro, 2005. p. 39-64.

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

KRAHL, L. L.; MARCHI, G.; PAZ, S. P. A.; ANGÉLICA, R. S.; SOUSA-SILVA, J. C.; VALADARES, L. F.; MARTINS, E. de S. Increase in cation Exchange capacity by the action of maize rhizosphere on Mg or Fe biotite-rich rocks. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 52, 2022.

KRAHL, L. L.; PAZ, S. P. A. da; ANGÉLICA, R. S.; VALADARES, L. F.; SOUZA-SILVA, J. C.; MARCHI, G.; MARTINS, E. de S. Successive off take of elements by maize grown in pure basalt powder. **African Journal of Agricultural Research**, v. 15, p. 229-239, fev. 2020.

KRAHL, L. L., VALADARES, L. F., SOUSA-SILVA, J. C., MARCHI, G., & MARTINS, É. DE S. (2022). Dissolution of silicate minerals and nutrient availability for corn grown successively. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 57(Regional Agrominerals), e01467. <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2022.v57.01467>

KULAIIF, Y.; FERNANDES, F. R. C. Panorama dos agrominerais no Brasil: atualidade e perspectivas. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Eds.) **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 380 p.

KÜPPER, A. Fatores climáticos e edáficos na cultura cafeeira. In MALAVOLTA, E.; YAMADA, T.; GUIDOLIN, J. A. **Nutrição e adubação do cafeeiro**. Piracicaba: Instituto Potassa e Fosfato, 1981. 224 p.

LAFORET, M. R. *A transferência de tecnologia de processos de produção de fertilizantes organominerais: pesquisa-ação sobre uma parceria público-privada*. Dissertação (Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual, Inovação e Desenvolvimento) – Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), Rio de Janeiro, 2013.

LANGE, A.; CARVALHO, J. L. N. de; DAMIN, V.; CRUZ, J. C.; MARQUES, J. J. Alterações em atributos do solo decorrentes da aplicação de nitrogênio e palha em sistema semeadura direta na cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p.460-467, mar-abr, 2006.

LATOUCHE, S.; **Pequeno tratado do decrescimento sereno**. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2018. 170 p.

LEFEBVRE, D.; GOGLIO, P.; WILLIAMS, A.; MANNING, A. C.; AZEVEDO, A. C. de; BERGMANN, M.; MEERSMANS, J.; SMITH, P. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 468-481, out. 2019.

LEONARDOS, O.H.; FYFE, W.S.; KRONBERG, B.I. Rochagem: O método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. **Anais 29 Cong. Brasil. Geol.**, Belo Horizonte, p. 137-145. 1976.

LEONARDOS, O.H.; FYFE, W.S.; KRONBERG, B. I. The use of ground rocks in laterite systems: An improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology**, 60(1-4), 361-370. 1987. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90143-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90143-4)

LEONARDOS, O.H.; THEODORO, S.H.; ASSAD, M.L. (2000). Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 56, p. 3-9, 2000.

LEPESTEUR, Muriel. Human and livestock pathogens and their control during composting. **Critical reviews in environmental science and technology**, 2021. DOI: [10.1080/10643389.2020.1862550](https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1862550)

LEPSCH, I.F.; BELLINAZZI-JÚNIOR, R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 4ª aproximação. Campinas: SBCS, 1983. 175p.

LEPSCH, I. V. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LIMA, M.C.A.; LEITE, J.P.; LYRA, M.A. **Emprego de rochas trituradas como fertilizante potássico na lavoura canavieira**. Recife: Secretaria de Agricultura, Instituto de Pesquisas Agronômicas de Pernambuco, Boletim Técnico 40, 37 p. 1969.

LIMA, C. C. de; GOMES, T. C., de A. Concentração de nutrientes em compostos orgânicos influenciada pela adição de pós de rochas silicatadas. **Educte**, v. 1, p. 33-39, 2011.

LIU, L; WANG, S.; GUO, X.; ZHAO, T.; ZHANG, B. Succession and diversity of microorganisms and their association with physicochemical properties during green waste thermophilic composting. **Waste Management**, v. 73, p. 101-112, 2018.

LI, J.; MAVRODI, D. V.; DONG, Y. Effect of rock dust-amended compost on the soil properties, soil microbial activity, and fruit production in an apple orchard from the Jiangsu province of China. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-14, 2020.

LIEBIG, J. von. **Die Chemie in Ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie**. Braunschweig: Vieweg, 1865.

LOPES, E. L. N.; FERNANDES, A. R.; TEIXEIRA, R. A.; SOUSA, E. S.; RUIVO, M. L. P. Soil attributes under different crop management systems in an Amazonian Oxisols. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p. 428-435, out./dez. 2015.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America*, v. 77, p. 461-472, 2013.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72-82, 2018.

LUCHESI, A.V.; PIVETTA, L. A.; BATISTA, M. A.; STEINER, F.; GIARETTA, A. P. S.; CURTIS, J. C. D. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal of Agricultural Research**, 17, 487-497. 2021.

MAAR, J. H. Justus Von Liebig, 1803-1873. Parte 1: Vida, Personalidade, Pensamento. **Química Nova**, v. 29, p.1129-1137, 2006.

MACKINTOSH, E. E.; LEWIS, D. G. Displacement of potassium from micas by dodecylammonium chloxiide. In: **International Congress of Soil Science**, 9., Adelaide, 1968. Transactions. Adelaide, 1968. v. 4. P. 695-703.

MAGALHÃES, W. L. E.; SÁ, F. P.; BELNIKI, A. C.; LIMA, E. A. de. **Composto produzido com resíduos da agroindústria do palmito pupunha**. Colombo: Embrapa Florestas, 2021. 8 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 473).

MALAVOLTA, E. Necessidade de alimentos e política de fertilizantes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 16, n.1, p. 1-26, 1981.

MALTA, M. R.; PEREIRA, R. G. F. A.; CHAGAS, S. J. de R. Condutividade elétrica e lixiviação de potássio do exsudato de grãos de café: alguns fatores que podem influenciar essas avaliações. **Ciênc. agrotec.** 29 (5) • Out 2005.

MANGIÉRIA-JUNIOR, R. Integração no organismo agrícola. In: HAMMES, V. S. **Agir, percepção da gestão ambiental**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002.

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

MANNING, D. A. C.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, 7(2), p. 480–487, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>

MATICHENKOV, V.V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical proprieties. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G. H.; KONDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**, Elsevier Science, 2001. Volume 8.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Café no Brasil. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>>. Acesso em: 12 julho 2018.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2005. **Instrução Normativa nº. 23, de 31 de agosto de 2005**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Diário Oficial, Seção 1, p.12.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2016. **Instrução Normativa nº. 5, de 10 de março de 2016**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Diário Oficial, Seção 1, p.10.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa 61, de 08 de julho de 2020**. Normatização dos fertilizantes orgânicos e biofertilizantes. Brasília, DF. Diário Oficial da União, Seção 1, p. 5.

MARCHI, G.; GUELFY-SILVA, D. R.; MALAQUIAS, J. V.; GUILHERME, L. R. G.; SPEHAR, C. R.; MARTINS, E. de S. Solubility and availability of micronutrients extracted from silicate agrominerals. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Thematic Issue - Regional Agrominerals, 55, e00807, 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2020.v55.00807>

MARTINAZZO, R.; BERGMANN, M.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; TORRES, D. P.; SANDER, A. **Micronutrientes e metais pesados em agrominerais: caracterização de rochas do escudo sul-rio-grandense e da Bacia do Paraná**. Pelotas, Embrapa Clima Temperado, Série Documentos, 488, 49 p, 2020.

MARTINEZ, H. M. P.; CLEMENTE, J. M.; LACERDA, J. S.; NEVES, Y. P.; PEDROSA, A. W. Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 61, Suplemento, p. 838-848, nov/dez, 2014.

MARTINS, B. H.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; MIYAZAWA, M.; VIEIRA, K. M.; MILORI, M. B. P. Soil organic matter quality and weed diversity in coffee plantation area submitted to weed control and cover crops management. **Soil and Tillage Research**, v. 153, p. 169-174, nov. 2015.

MARTINS, D. R.; CAMARGO, O. A. de; BATACLIA, O. C. Qualidade do grão e da bebida em cafeeiros tratados com lodo de esgoto, **Bragantia**, 64 (1), 2005.

MARTINS, E. S. Proposta de critérios de normatização de rochas silicáticas como fontes de nutrientes e condicionadores de solos. In Theodoro et al (Ed.), II Congresso Brasileiro de Rochagem, Poços de Caldas-MG, p. 368–378, 2013.

MARTINS, E. de S.; RESENDE, A. V. de; OLIVEIRA, C. G. de; FURTINI-NETO, A. E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Eds.) **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 380 p.

MARTINS, E. S.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; MARTINAZZO, R.; BERGMANN, M.; ANGÉLICA, R. S. 2014. Silicate agrominerals as nutrient sources and as soil conditioners for tropical agriculture. In International Scientific Centre of Fertilizers (Ed.), **WORLD FERTILIZER CONGRESS OF CIEC**, 16. Technological innovation for a sustainable tropical agriculture: proceedings. Rio de Janeiro: In: **WORLD FERTILIZER CONGRESS OF CIEC**, 16., 2014, Rio de Janeiro ....

MASSUKADO, L.M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**. 2008. 204 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MATICHENKOV, V.V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G. H.; KONDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**, Elsevier Science, 2001. Volume 8.

- MATIELLO, J. B.; GARCIA, A. W. R. É preciso melhorar o aproveitamento dos adubos no cafezal. **Procafé On line**, Clube de Tecnologia Cafeeira, Folha Técnica 213 Fundação Procafé.
- MATTOS, W. R. S. Sistemas de estabulação livre para bovinos. In: Simpósio sobre pecuária leiteira, 1, 1977, Águas da Prata. **Anais...** Juíz de Fora: Embrapa, 1977, p. 123-139.
- MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo**: do neolítico à crise contemporânea. São Paulo: Editora UNESP; Brasília, DF: NEAD, 2010. 568 p.
- MELAMED, R., GASPAR, J. C., & MIEKELEY, N. Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais. **Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 385–395, 2009.
- MELO, L. C. A.; SILVA, C. A.; DIAS, B. de O. Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 101-110, Feb. 2008.
- MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; DIAS, F. de O.; BARBOSA, G. F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 471 – 476, 2012.
- MELO, W J. de. Uso de resíduos na agricultura e qualidade ambiental. In: In: SILVEIRA, A. P. D. da; FREITAS, S. dos. S. **Microbiota do solo e qualidade ambiental**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2007. 312 p.
- MENDES, G. G.; QUEIROZ, G. L.; MARTINS, E. da S.; MARTINS, H. L.; ARRUDA, V. M.; MATA, J. F. da. Análises química, física e microbiológica de solos em sistemas de cultivo convencional e orgânico/agroecológico na cultura da alface. **Revista de Geografia – PPGeo – UFJF**, v. 13, n. 1, 2023.
- MENDES, I. C.; CAETANO, J. O.; HERNANI, L. C. ; REIS JUNIOR, F. B.; BENITES, V. M. Soil enzymes activities in Cerrado's grain-crops farming systems with Brachiaria. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 3., 2015, Brasília, DF. Towards sustainable intensification: proceedings. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; REIS-JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D. M. G. de; DANTAS, O. D.; OLIVEIRA, M. I. L.; MALAQUIAS, J. V. **Tecnologia BioAS**: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 50 p.
- MENDES, Ieda de Carvalho et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: the FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019.

MENDES, I. C. Indicadores biológicos de qualidade de solo em sistemas de plantio direto no Brasil: estado atual e perspectivas futuras. In: MOREIRA, F. M. S.; KASUYA, M. C. M. (Ed.). **Fertilidade e biologia do solo**: integração e tecnologia para todos. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, v. 12, p. 297-322, 2016.

MENDES, I.C; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, Fábio Bueno dos; ALVES de C. L, ANDRÉ. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2018 (Circular Técnica, 38).

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; DANTAS, O. D.; LOPES, A. A. C.; REIS JUNIOR, F. B. R.; OLIVEIRA, M. I.; CHAER, G. M. Soil quality and grain yield: A win-win combination in clayey tropical oxisols, **Geoderma**, Volume 388, 2021.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, p. 399- 462, 2019.

MENDES, R. C.; LOURINHO, M. T.; LOURINHO, D. T.; LOPES, W. E. A.; COSTA, P. S. S. da. Sustentabilidade na produção de resíduos: proposta de reaproveitamento dos resíduos sólidos em uma fábrica de açaí. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. 3, 2020.

MENDONÇA, F; DANNI-OLIVEIRA, I. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

MENDONÇA, L. M. V. L.; PEREIRA, R. G. F. A.; MENDES, A. N. G. (2005) Parâmetros bromatológicos de grãos crus e torrados de cultivares de café (Coffea arabica L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 25:239-243

MENDOZA, H. N. Efeitos de sistemas de colheita dos canaviais sobre propriedades químicas e biológicas em solos de Tabuleiro no Espírito Santo. Rio de Janeiro. Dissertação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 113p. 1996.

MESQUITA, C. M. de; REZENDE, J. E. de; CARVALHO, J. S.; FABRI-JÚNIOR, M. A.; MORAES, N. C.; DIAS, P. T.; CARVALHO, R. M. de; ARAÚJO, W. G. de. **Manual do café**: colheita e preparo (Coffea arábica L.). Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016a. 52 p. il.

MESQUITA, C. M. de; REZENDE, J. E. de; CARVALHO, J. S.; FABRI-JÚNIOR, M. A.; MORAES, N. C.; DIAS, P. T.; CARVALHO, R. M. de; ARAÚJO, W. G. de. **Manual do café**: implantação de cafezais Coffea arábica L. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016b. 50 p. il.

MESQUITA, C. M. de; REZENDE, J. E. de; CARVALHO, J. S.; FABRI-JÚNIOR, M. A.; MORAES, N. C.; DIAS, P. T.; CARVALHO, R. M. de; ARAÚJO, W. G. de. **Manual do café**: manejo de cafezais em produção. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016c. 72 p. il.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2012. 276 p.

MISRA, R. V.; ROY, R. N.; HIRAOKA, H. 2003. **On- farm composting methods**. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 48pp.

MISSOUX, M. Sur l'emploi de la poudre des roches granitiques comme excitant de la vegetation. **Compt Rend Acad Sci** (Paris) t 36: p. 1136; t 37: p. 245. 1853.

MONTGOMERY, D. R. **Erosão: dos solos às civilizações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2021.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 626 p.

MOREIRA, M. S.; GUIMARÃES, G. L. de O.; VIEIRA, F. R.; FURTADO, E. L.; MING, L. C. Análise quantitativa de microrganismos considerando os atributos físico e químico do solo em diferentes manejos. In: MING, L. C.; VAL, M. F. do; FRANCO, F. S.; CARMO, M. S. do; MOREIRA, M. S. **Plantando sonhos: experiências em agroecologia no estado de São Paulo**. Feira de Santana: Sociedade Brasileira de Etnobiologia e Etnoec, 2018. 311 p.

MORTLAND, M. M.; LAWTON, K.; UEHARA, G. Alteration of biotite to vermiculite by plant growth. **Soil Science**, v. 82, 1956.

MOTA, V. C.; ANDRADE, E. T. de; LEITE, D. F. Use of compost bedded pack barn in maize fertilization for silage. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 4, p. 1571-1588, out./dez. 2020.

MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRÉON, F. M. IPCC AR5. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, 2013.

NASSER, M. D.; TARSITANO, M. A. A.; LACERDA, M. D.; KOGA, P. S. L. Análise econômica da produção de café arábica em São Sebastião do Paraíso, Estado de Minas Gerais. **Informações Econômicas**, SP, v. 42, n. 2, 2012.

NEMECEK, T.; KAGI, T. Life cycle inventories of Agricultural Production Systems. **Ecoinvent report** n, 15. Final Rep, 2007.

ORRICO, A. C. A.; LUCAS-JÚNIOR, J. de; ORRICO-JÚNIOR, M. A. P. Alterações físicas e microbiológicas durante a compostagem dos dejetos de cabras. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.764-772, set./dez. 2007.

ORRICO-JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS-JÚNIOR, J. de. Compostagem da fração sólida da água residuária de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.3, p.483-491, jul./set. 2009.

- ORRICO-JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS-JÚNIOR, J. de. Compostagem dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças de aves. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 538-545, 2010.
- O'BRIEN, T. A.; BARKER, A. V.; CAMPE, J. Container production of tomato with food by-product compost and mineral fines. **Journal of plant nutrition**, v. 22, n. 3, p. 445-457, 1999.
- PAGLIAI, M.; ANTISARI, L. V. Influência dos restos de matéria orgânica nas macro e microestruturas do solo. **Bioresource Technology**, v.43, p.205-13. 1993.
- PAIVA, E. C. R. **Assessment of the composting of poultry carcasses by bin methods and aerated static piles**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia; Saneamento ambiental) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Climate Food Security in Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>. Acesso em: 02 jan. 2023.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Chapter 11: N<sub>2</sub>O emissions from managed soils, and CO<sub>2</sub> emissions from lime and urea application. In: Calvo Buendía, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Federici, S. (Eds.), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. Switzerland.
- PALHARINI, M. C. de A.; SANTOS, C. A. de J. P.; SIMIONATO, E. M. R. S.; KODAWARA, R. K.; KLUGE, R. A. Efeito do dióxido de cloro sobre a microbiota e escurecimento enzimático de vagem minimamente processada. **Horticultura Brasileira**, v. 33, n. 2., 2015.
- PANDEY, Divya; AGRAWAL, Madhoolika; BOHRA, Jitendra Singh. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 51-60, 2014.
- PARTELLI, F. L.; BUSATO, J. G.; VIEIRA, H. D.; VIANA, A. P.; CANELLAS, L. P. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural**, v.39, n.7, out, 2009.
- PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2007. 579 p.
- PAZUTTI, L. V. B.; CHAER, G. M. **Desenvolvimento de metodologia de baixo custo para análise de B-glicosidase em solos**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2012. 92 p.

- PEDROSA, T. D.; FARIAS, C. A. S. de; PEREIRA, R. A.; FARIAS, E. T. do R. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais, **Nativa**, Sinop, v. 01, n. 01, p. 44-48, out./dez., 2013
- PEIXOTO, R.T. dos. G. **Compostagem**: opção para o manejo orgânico do solo. Londrina: IAPAR, 1988. 46 p.
- PENTEADO, S. R. **Adubação orgânica**: compostos orgânicos e biofertilizantes. 3. ed. São Paulo: Via Orgânica, p. 160. 2010.
- PERA, A. *et al.* Co - composting for managing effluent from thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. **Environmental technology**, v. 12, n. 12, p. 1137-1145, 1991.
- PEREIRA-NETO, J. T. **Manual de compostagem**. Belo Horizonte: UNICEF, 1996.
- PEREIRA-NETO, J.T. **Manual de compostagem**: processo de baixo custo. UFV. Viçosa, 2007. 81 p.
- PEREIRA-NETO, J.T. Monitoramento da eliminação de organismos patogênicos durante a compostagem de resíduos urbanos e lodo de esgoto pelo sistema de pilhas estáticas aeradas. **Engenh. Sanit.**, v. 27, p. 148-152, abr./jun. 1988.
- PERES, F. C.; HIRONAKA, G. M. F. N.; CANZIANI, J. R.; GUIMARÃES, V. di A.; OLIVEIRA, M. M. C. de. **O programa empreendedor rural**. Curitiba: SEBRAE/PR e SENAR/PR, 2010.
- PERLIN, A. P.; ALVARES, M. V.; KNEIPP, J. M.; VESTENA, D.; ROSSATO, G. Gestão de resíduos sólidos em uma organização militar do Rio Grande do Sul. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis v. 9, n. 3, 2020.
- PETERSEN, P.; SILVEIRA, L. M. da; FERNANDES, G. B.; ALMEIDA, S. G. **Método de análise econômico-ecológica de Agroecossistemas**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 2017. 246 p.
- PETTERSEN-NETO, C. **Grãos biodinâmicos**. Botucatu: Associação Brasileira de Agricultura Biodinâmica, 2010. 24 p.
- PICCOLO, A.; MBAGWU, J. S. C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. **Plant and Soil**, v. 123, p. 27-37. 1990.
- PIMENTA, C. J.; CHAGAS, S. J. de R.; COSTA, L. Polifenoloxidase, lixiviação de potássio e qualidade de bebida do café colhido em quatro estádios de maturação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 2, 1997.
- PINHEIRO, S. **Agroecologia 7.0**. Porto Alegre: Juquira Candiru Satyagraha, 2018. 663 p.

PINHEIRO, S.; AURVALLE, A.; GUAZELLI, M.J. **Agropecuária sem veneno**. Porto Alegre: L&PM, 1985.

PINHEIRO, S. **Biopoder camponês: território, questão agrária, agroecologia, espiritualidade e a nutrição ultrassocial**. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, 2021. 282 p.

PINHEIRO, S. **Cartilha da saúde do solo e inocuidade dos alimentos (Cromatografia de Pfeiffer)**. Porto Alegre: Sales Editora, 2011. 122 p.

PORTILLO, N. & LEONARDOS, O.H.: pH de abrasão em rochas e sua aplicação na agricultura. **Boletim Mineralógico**, 4, Recife, 43-46, 1976.

PRATT, C.; KINGSTON, K.; LAYCOCK, B.; LEVETT, I.; PRATT, S. Geo-Agriculture: Reviewing Opportunities through Which the Geosphere Can Help Address Emerging Crop Production Challenges. **Agronomy**, 10(7), 971, 2020.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy10070971>

PRESS, F.; GROTZINGER, J.; SIEVER, R.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656 p.

PRIMAVESI, A. **Agroecologia: ecosfera, tecnosfera e agricultura**. São Paulo: Nobel, 1997.

PRIMAVESI, A. **Cartilha do solo**. São Paulo: Fundação Mokiti Okada, 2006, 1ed., p. 8-7

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico de pragas e doenças: técnicas alternativas para a produção agropecuária e defesa do meio ambiente**. São Paulo: Expressão Popular, 2016. 143 p.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Expressão Popular, 2002. 125 p.

PRIMAVESI, A. **Pergunte o porquê ao solo e às raízes: casos que auxiliam na compreensão de ações eficazes na produtividade agrícola**. São Paulo: Expressão Popular, 2021. 356 p.

PRIMO, D. C., MENEZES, R. S. C., SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, v. 7, n. 5, 2011.

PRIYONO, J.; GILKES, R. J. Dissolution of milled-silicate rock fertilisers in the soil. **Soil Research**, 42(4), 441, 2004. <https://doi.org/10.1071/SR03138>

PRIYONO, J.; SUTRIONO, R.; ARIFIN, Z. Evaluation for the Potential Use of Silicate Rocks from Four Volcanoes in Indonesia as Fertilizer and Soil Ameliorant. **J. Tanah Trop.**, 14(1), p. 1–8, 2009.

RAHMAH, D.M.; PUTRA, A.S.; ISHIZAKI, R.; NOGUCHI, R.; AHAMED, T. A Life Cycle Assessment of Organic and Chemical Fertilizers for Coffee Production to Evaluate Sustainability toward the Energy–Environment–Economic Nexus in Indonesia. *Sustainability*, v.14, n. 3912, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14073912>.

RAMÍREZ, V.S.; MATOS, A.T. Influência da textura do solo receptor e das condições climáticas e ambientais na taxa e fração de mineralização da matéria orgânica no solo, *Eng Sanit Ambient*, v.27, n.2, mar./abr. 2022, p. 315-323

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

RAMOS, C. G.; HOWER, J. C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S.; THEODORO, S. H. Possibility of uses of silicate rocks powder: A review. *Geoscience Frontiers*, 101185, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>

RAMOS, F. T; DORES, E. F. G. C.; WEBER, O. L. S.; BEBER, D. C.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; MAIA, J. C. S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, v. 98, p. 3595-3602, 2018.

RASAPOOR, M.; ADL, M.; POURAZIZI, B. Comparative evaluation of aeration methods for municipal solid waste composting from the perspective of resource management: a practical case study in Tehran, Iran. *Journal of Environmental Management*, v. 184, p. 528-534, 2016.

RESENDE, A. V.; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, E. S.; NASCIMENTO, M. T.; SENA, M. C.; SILVA, L.; LINHARES, N. W. Rochas moídas como fontes de potássio para o milho em solo de cerrado. In: **Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** (162), 20 p., 2006  
<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/567446/1/bolpd162.pdf>>

RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, C.G.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KINPARA, D.I.; OLIVEIRA FIÇHO, E.C. Suprimento de Potássio e Pesquisa de Uso de Rochas in natura na Agricultura Brasileira. **Espaço & Geografia (UnB)**, v. 9, p. 19-42. 2006.

RESTREPO, J.R.; PINHEIRO, S. **Agricultura Orgânica**: La remineralización de los alimentos y la salud a partir de la regeneración mineral del suelo. Carmina editores, Tegucigalpa Honduras, 2010. 3º Ed. 125p.

REZENDE, E. I. P.; ANGELO, L. C.; SANTOS, S. S. dos; MANGRICH, A. S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 5, 2011.

RIBEIRO, L. da S.; SANTOS, A. R. dos; SOUZA, F. da S.; SOUZA, J. S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fonte de nutriente para as plantas dos solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, p. 891-897, 2010.

- RIFFALDI, R.; LEVI-MINZI, R.; SAVIOZZI, A.; CAPURRO, M. Evaluating garbage compost. **Biocycle**,33, 66- 69,1992.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Org.). **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. p. 151-212.
- RIBEIRO, J. F. & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma do cerrado: os biomas do Brasil. In: **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1998. p. 89 – 116.
- RICI, M. dos S. F.; NEVES, M. C. P. **Cultivo do café orgânico**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2004. 95 p.
- RIETZ, D. N.; HAYNES, R. J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 6, p. 845-854, 2003.
- ROCCO, G. K.; HENKES, J. A. Biocombustíveis sustentáveis para a aviação no Brasil. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. 4, p. 191-226, out/dez. 2020.
- ROCHA, E. J. P. L. **Agroflorestas sucessionais no assentamento Fruto D’anta/MG: potenciais e limitações para a transição agroecológica**. 2006. 142 p. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília/DF, 2006.
- RODRIGUES, A. F. S. Agronegócio e mineral negócio: relações de dependência e sustentabilidade. In: \_\_\_\_\_. **Informe mineral: desenvolvimento e economia mineral**. Brasília: DNPM, 2009. p. 28-47.
- RODRIGUES, H. J. B.; SÁ, L. D. de A.; RUIVO, M. de L. P.; COSTA, A. C. L. da; SILVA, R. B. da; MOURA, Q. L. de; MELLO, I. F. de. Variabilidade quantitativa de população microbiana associada às condições microclimáticas observadas em solo de floresta tropical úmida. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Pará, p. 629 – 638, dez. 2011.
- RODRIGUES, M.; NANNI, M. R.; POSSER SILVEIRA; C. A.; DA SILVA GUALBERTO, A. A. Mining coproducts as alternative sources of nutrients for the cultivation of sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Journal of Cleaner Production**, 291, 125925, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125925>
- RODRIGUES, M.; VAHL, L. C.; SILVEIRA, C. A. P.; SALÉ, M. M.; NANNI, M. R.; BATISTA, M. A. Co-products from the limestone mining as sources of calcium, magnesium and sulphur. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 15, 100446, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100446>
- RODRIGUES, M. S.; SILVA, F. C. da; BARREIRA, L. P.; KOVACS, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. In: SPADOTTO, C. A.;

RIBEIRO, W. C. (Org.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. 1.ed. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais. 2006, v.1, p. 63- 94

ROMEIRO, A. R. **Meio Ambiente e Dinâmica de Inovações na Agricultura**. São Paulo: Annablume: FAPESP, 1998. 272p.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010.

RUDMIN, M.; BANERJEE, S.; MAKAROV, B.; MAZUROV, A.; RUBAN, A.; OSKINA, Y., ... SHALDYBIN, M. An investigation of plant growth by the addition of glauconitic fertilizer. **Applied Clay Science**, 180, 105178, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105178>

RUSCH, H. P. **Bodenfruchtbarkeit: eine Studie biologischen Denkens**. Stuttgart: Haug Verlag, 1985.

SANTOS, B. de S. **A cruel pedagogia do vírus**. Coimbra: Edições Almedina, S. A, 2020. 32 p.

SANTOS, H. G. et al. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SANTOS, G. A; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 491 p.

SANTOS, L. F., SODRÉ, F. F., MARTINS, E. S., FIGUEIREDO, C. C., BUSATO, J. G. Effects of biotite syenite on the nutrient levels and electrical charges in a Brazilian Savanna Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 51, e66691, 2021.  
<https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166691>

SARCINELLI, O.; RODRIGUEZ, E. O. (2006) Análise do desempenho econômico e ambiental de diferentes modelos de cafeicultura em São Paulo – Brasil: estudo de caso na região cafeeira da Média Mogiana do Estado de São Paulo. **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, 5:13-26.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean Quercus ilex L. Forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 3, p. 455-461, 2005.

SARDINHA, D. de S.; GODOY, L. H.; CONCEIÇÃO, F. T. da; SPATTI-JÚNIOR, E. P.; FERNANDES, A. M.; VICTAL, F. A. de C. A.; COSTA, D. A. T. Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais, **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 18, n. 1, Março 2018

SARDINHA, D. de S., GODOY, L. H., CONCEIÇÃO, F. T da. Taxa de intemperismo químico e consumo de CO2 em relevo cuestasiforme com substrato basáltico e arenítico no estado de São Paulo, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, 19(2), 117-134, 2019.  
<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-140702>

- SCHELLER, E. **Fundamentos científicos da nutrição vegetal na agricultura ecológica**. Botucatu: Associação Brasileira de Agricultura Biodinâmica, 2000. 94.
- SCHUMACHER, E. F. **O negócio é ser pequeno**: um estudo de economia que leva em conta as pessoas. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1983. 261 p.
- SEDIYAMA, M. A. N.; GARCIA, N. C. P.; VIDIGAL, S. M.; MATOS, A. T. de. Nutrientes em compostos orgânicos de resíduos vegetais e animais. **Scientia Agrícola**, v.57, n.1, p.128-135, 2000.
- SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Café: colheita e pós-colheita**. Brasília: SENAR, 2017.
- SETIAWATI, T.C., MUTMAINNAH, L. Solubilization of Potassium Containing Mineral by Microorganisms From Sugarcane Rhizosphere. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, 9, p. 108–117, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.134>
- SEYMOUR, J. **Guia prático da autosuficiência**. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2011. 253 p.
- SHARMA, V.K., M. CANDITELLI, F. FORTUNA AND C. CORNACCHIA. Processing of urban and agroindustrial residues by anaerobic composting: review. **Energ. Convers. Manage.**,38: 453-478, mar. 1997.
- SIKORA, L. J. Effects of basaltic mineral fines on composting. **Waste management**, v. 24, n. 2, p. 139-142, 2004.
- SILVA, F. A. de M.; GUERRERO LOPEZ, F.; VILLAS BOAS, R. L.; SILVA, R. B. da. Transformação da matéria orgânica em substâncias húmicas durante a compostagem de resíduos vegetais, **Revista Brasileira de Agroecologia** v. 4, n.1, p.59-66, 2009.
- SILVA, R.C. DA; CURY, M.E.; IEDA, J.J.C.; SERMARINI, R.A.; AZEVEDO, A.C. Chemical attributes of a remineralized oxisol. **Ciência Rural**, 47, 2017.
- SILVA, S. P. A. da. **Efeito de corretivos orgânicos de resíduos vinícolas e biochar, com diferentes tempos de compostagem, na cultura do alface**. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Biológica) – Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, 2019.
- SILVA, V. M. da; RIBEIRO, P. H.; TEIXEIRA, A. F. B., SOUZA, J. L. de. Qualidade de compostos orgânicos preparados com diferentes proporções de ramos de gliricídia (*Gliricidia sepium*). **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, n. 1, p. 187-198, abr. 2013.
- SILVESTRE, A. L. **Análise de dados e estatística descritiva**. Curitiba: Escolar Editora, 2007. 352 p.

SOARES, J.D.; REZENDE, R.A.L.S.; REZENDE, R.M.; BOTREL, E.P.; CARVALHO, A.M. Compostagem de resíduos agrícolas: uma fonte de substâncias húmicas. **Scientia Agraria Paraensis**, v. 16, n. 4, p. 414-421, 2017.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. de V.; SILVA, A. J. da.; ANJOS, J. L. dos. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 13 p.

SONG, S.K. and HUANG, P.M., Dynamics of Potassium Release from Potassium-Bearing Minerals as Influenced by Oxalic and Citric Acids. **Soil Science Society of America Journal**, 52: 383-390, 1998.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

SOUSA, L. B.; SILVA, V. S. G. da; FREITAS, M. C.; MARTINS, M. dos S.; SILVA, C. C. G. da; SILVA, E. V. N. da; SILVA, A. F. da. Caracterização morfofisiológica de diazotróficas de vida livre provenientes de solos sob diferentes coberturas vegetais do nordeste brasileiro, **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 9424-9430, feb. 2020.

STEENBOCK, W. **A arte de guardar o Sol: padrões da Natureza na reconexão entre florestas, cultivos e gentes**. Rio de Janeiro: Bambual Editora, 2021. 207 p.

STEINER, R. **Die Aufgabe der Antroposophie gegenüber Wissenschaft und Technik**. Dornach: Rudolf Steiner Verlag, 1977.

STEINER, R. **Fundamentos da agricultura biodinâmica: vida nova para a terra**. São Paulo: Antroposófica, 2017. 149 p.

STEVENSON, F. J. **Humus Chemistry: genesis, composition, reaction**. John Wiley & Sons, 1996. 496 p.

SUSZEC, M. **Efeitos da inoculação na compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos verdes urbanos**. 2005. 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2005.

SWOBODA, P; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of Total Environment**, v. 807, 3, 2022.

SZMIDT, R. A. K.; FERGUSON, J. **Co-utilization of rockdust, mineral fines and compost: working towards integrated resource recycling and use**, 2004. 36 p.

SZMIDT, R. A. K. Scope for co-utilization of compost and mineral rockdusts. In: **Biodegradable and Residual Waste Management**. Papadimitriou E.K. & E.I. Stentiford (Edits), 2004.

TABATABAI, M.A. & BREMNER, J.M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 34:225-229, 1970.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W. *et al.* (ed.). **Methods of soil analysis**. Part 2. Microbiological and biochemical properties. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison. p. 778–833, 1994.

TARDY, Y.; DUPLAY, J. A method of estimating the Gibbs free energies of formation of hydrated and dehydrated clay minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 56, 3007-3029, 1992.

TARUMOTO, M. B. **Basalt rock in sugarcane grown in ferralsols: changes in soil chemistry, mineralogy, and microbiology and in crop yield**. 2019. 109 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2019.

TAVARES, L. de F. **Disponibilização de potássio e silício de remineralizador pelo processo de compostagem**. 2017. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Agrária, Rio Paranaíba, 2017.

TAVARES, L.F., de CARVALHO, A.M.X., CAMARGO, L.G.B.; PEREIRA, S. G. de F.; CARDOSO, I. M. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. *Int J Recycl Org Waste Agricult*, 7, 89–98, 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x>

TAVERNE, Justine. **Innovative waste treatment by composting with minerals and worms: effects on carbon storage, soil properties and plant growth**. Ecology, environment. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017.

TEIXEIRA, M. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. Equipamento para extração de amostras indeformadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 693-699, 2000.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2008.

THEODORO, S. H. **Cartilha da rochagem**. Brasília: Gráfica e Editora Ideal, 2020. 32 p.

THEODORO, S. H.; DE PAULA MEDEIROS, F.; IANNIRUBERTO, M.; BAIOCCHI JACOBSON, T. K. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. **Journal of South American Earth Sciences**, 103014, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014>

THEODORO, S.H., MEDEIROS, F.P., IANNIRUBERTO, M., JACOBSON, T.K.B. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. **J. S. Am. Earth Sci.**, v. 107, 2021.

THEODORO, S. M. de C. H. **A Fertilização da Terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural**. 2000. 221 p. Tese (Doutorado

em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, 2000.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; ALMEIDA, E. de. (2010). Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos. In: Congresso Brasileiro de Rochagem, 1, 2010, Planaltina/DF. **Anais [...]**. Planaltina/DF: Embrapa, 2010. p. 173-181.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Rochagem: uma questão de soberania nacional. In: Congresso Brasileiro de Geoquímica, 13, 2011, Gramado/RS. **Anais [...]**. Gramado/RS: SBGq, 2011. p. 337-340

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Stonemeal: principles, potential and perspective from Brazil. In: T.J. Goreau, R.W. Larson, & J. Campe (Eds). **Geotherapy: Innovative Methods of Soil Fertility Restoration, Carbon Sequestration and Reversing CO2 Increase**. CRC Press, pp. 403–418, 2015.

THEODORO, S. H.; SANDER, A.; BURBANO, D. F. M.; ALMEIDA, G. R. Rochas basálticas para rejuvenescer solos intemperizados. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 22, n. 37, p. 01-120, jan./jun. 2021.

THEODORO, S. H.; TCHOUANKOUE, J. P.; GONÇALVES, A. O.; LEONARDOS, O.; HARPER, J. A Importância de uma Rede Tecnológica de Rochagem para a Sustentabilidade em Países Tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n.6 p.1390-1407, 2012.

TIQUIA, S. M.; TAM, N. F. Y. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. **Bioresource Technology**, v. 65, n. 1-2, p. 43-49, 1998.

TOSCANI, R. G. da S.; CAMPOS J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos altamente intemperizados. **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 259 – 274, 2017.

TRAUTMANN, N. M.; KRASNY, M. E. **Composting in the classroom**: scientific inquiry for high school students. Cornell University, 1997.

TSC - SCAA - Technical Standards Committee - Specialty Coffee Association of America. **Protocolo para análise sensorial de café**: metodologia SCAA. SCAA, 2008.

TUBAIL, K; CHEN, L.; MICHEL-JR., F. C.; KEENER, H. M.; RIGOT, J. F.; KLINGMAN, M.; KOST. D.; DICK, W. A. Gypsum additions reduce ammonia nitrogen losses during composting of dairy manure and biosolids. **Compost Science & Utilization**, v.16, n.4, p.285-293, 2008.

VALENTE, B.S.; XAVIER, E.G.; MORSELLI, T.B.G.A.; JAHNKE, D.S.; BRUM-JÚNIOR, B. de S.; CABRERA, B.R.; MORAES; P. de O.; LOPES, D.C.N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Arch. Zootec.** v. 58, p. 59-85, 2009

- VAN STRAATEN, P. **Agrogeology**: The use of rock for crops Enviroquest Ltd., 2007.440 p.
- VAN STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 731-747, dez. 2006.
- VINHA, A. P. C.; CARRARA, B. H.; SOUZA, E. F. S.; SANTOS, J. A. F. dos; ARANTES, S. A. C. M. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais, **Nativa**, v. 9, n. 1, p. 30-35, jan./fev. 2021.
- VINHAL-FREITAS, I. C.; WANGEN, D. R. B.; FERREIRA, A. S.; CORRÊA, G. F.; WENDLING, B. Microbial and enzymatic activity in soil after organic composting. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 3, p. 757-764, 2010.
- VON FRAGSTEIN, P.; VOGTMANN, H. Organic extracts for the treatment of rock powder fertilizers in biological agriculture. **Biological agriculture & horticulture**, v. 1, n. 3, p. 169-180, 1983.
- WALAN, P., DAVIDSSON, S., JOHANSSON, S., HÖÖK, M. Phosphate rock production and depletion: Regional disaggregated modeling and global implications. **Resources, Conservation and Recycling**, 93, 178–187, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.011>
- WANG, J. G.; ZHANG, F. S.; CAO, Y. P.; ZHANG, X. L. Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 56: 37-44, 2020.
- WELCH, B. L. The generalization of student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika*, 34(1/2), 28–35, 1947.
- WEINDORF, D. C.; MUIR, J. P.; LANDEROS-SÁNCHEZ, C. Organic Compost and Manufactured Fertilizers: Economics and Ecology. In: CAMPBELL, W.; LOPEZ-ORTIZ, S. (eds) **Integrating Agriculture, Conservation and Ecotourism**: Examples from the Field. Issues in Agroecology – Present Status and Future Prospectus, vol 1. Springer, Dordrecht, 2011. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1309-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1309-3_2)
- WIELAND, E.; WEHRLI, B.; STUMM, W. The coordination chemistry of weathering. III. A generalization on the dissolution rates of minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 52, p. 1969-1981, 1988.
- WINIWARTER, V.; BLUM, W. E. H. From marl to rock powder: On the history of soil fertility management by rock materials. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 171(3), 316–324, 2008. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625070>
- WISTINGHAUSEN, C. von; SCHEIBE, W. HEILMANN, H. WISTINGHAUSEN, E. von; KÖNIG, U. J. **Manual para o uso dos preparados biodinâmicos**. São Paulo: Antroposófica, 2000.

WU, S.; LIU, Y.; SOUTHAM, G.; ROBERTSON, L. M.; WYKES, J., YI, Q., ... HUANG, L. Rhizosphere Drives Biotite-Like Mineral Weathering and Secondary Fe–Si Mineral Formation in Fe Ore Tailings. **ACS Earth and Space Chemistry**, 5(3), p. 618–631, 2021. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00331>

XUE, X; ZHANG, L.; PENG, Y.; LI, P.; YU, J. Effects of Mineral Structure and Microenvironment on K Release from Potassium Aluminosilicate Minerals by *Cenococcum geophilum* fr, **Geomicrobiology Journal**, 36:1, 11-18, 2019.

ZAGO, L.M.S.; MOREIRA, A.K.O.; SILVA-NETO, C.M.; NABOUT, J.C.; FERREIRA, M.E.; CARAMORI, S.S. Biochemical activity in Brazilian Cerrado soil differentially affected by perennial and annual crops. **Australian Journal of crop Science**, v. 12, n. 02, p. 235-242, 2018.

ZAGO, L.M.S.; RAMALHO, W.P.; SILVA-NETO, C.M.; CARAMORI, S.S. Biochemical indicators drive soil quality in integrated crop-livestock-forestry systems. **Agroforest systems**. v. 94, p. 2249-2260, 2020

ZHANG, L. GADD, G. M.; LI, Z. Microbial biomodification of clay minerals. *Advances in Applied Microbiology*, **Academic Press.**, v. 114, 2020. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2020.07.002>

ZHANG, Y.; HE, Y. Co-compostig solid swine manure with pine sawdust as organic substrate. **Bioresource Technol.**, v. 97, p. 2024- 2031, nov. 2006.

ZHAO, X.; GAO, S.; LU, D., WANG, H.; CHEN, X.; ZHOU, J.; ZHANG, L. Can Potassium Silicate Mineral Products Replace Conventional Potassium Fertilizers in Rice–Wheat Rotation? *Agronomy Journal*, 111(4), p. 2075–2083, 2019. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.01.0020>

ZHU, N. Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. **Bioresource Technol.**, v. 98, p. 9-13, 2007.

ZINN, Y. L.; SILVA, C. A. Preservação e sequestro de carbono orgânico em solos de cafezais no Brasil. In: **Manejo do solo na cafeicultura: produtividade e sustentabilidade** / Carla Eloize Carducci, Geraldo César de Oliveira, organizadores. – Lavras: UFLA, 2021. 135 p.: il.