

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

ANDREZA BECKER DE BORBA

**FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A BASE DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA
INDÚSTRIA DE CELULOSE E DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS**

São Leopoldo

2024

ANDREZA BECKER DE BORBA

**FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A BASE DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA
INDÚSTRIA DE CELULOSE E DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS**

Projeto de Dissertação apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Prof.^a Dra. Regina Célia Espinosa Modolo

Co-orientadora: Prof.^a Dra. Suse Botelho da Silva

São Leopoldo

2024

B726f

Borba, Andreza Becker de.

Fertilizante organomineral a base de resíduos sólidos da indústria de celulose e do beneficiamento de rochas ornamentais / Andreza Becker de Borba. – 2024.

59 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

“Orientadora: Prof.^a Dra. Regina Célia Espinosa Modolo
Co-orientadora: Prof.^a Dra. Suse Botelho da Silva”.

1. Fertilizantes organomineral. 2. Resíduos sólidos. 3. Indústria de celulose. 4. Rochas ornamentais I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster Ditbenner – CRB 10/2517)

RESUMO

A indústria de celulose e de rochas ornamentais geram elevadas quantidades de resíduos sólidos industriais, geralmente destinados a aterros. Concomitantemente, verifica-se a crescente demanda por fertilizantes agrícolas e os problemas ambientais decorrentes do uso excessivo de produtos químicos, os quais conferem impactos negativos ao meio ambiente, levando à busca por alternativas mais sustentáveis no setor agrícola. Com base no exposto essa pesquisa tem como objetivo geral a valorização dos resíduos gerados na indústria de celulose e no beneficiamento de rochas ornamentais através do desenvolvimento de um fertilizante organomineral. A metodologia foi dividida em quatro etapas: coleta e caracterização dos resíduos (casca de eucalipto, lodo da estação de tratamento de efluentes, lama de carbonato de cálcio e lama do beneficiamento de rochas ornamentais), desenvolvimento das formulações de fertilizantes organominerais, caracterização do fertilizante produzido e, por fim, avaliação da produção vegetal utilizando rúcula Rokita como planta-teste. As formulações dos fertilizantes foram realizadas com diferentes proporções dos resíduos, e o desempenho dos tratamentos foi comparado a um fertilizante comercial. Os resultados mostraram que as formulações experimentais, promoveram uma melhoria significativa na disponibilidade de macronutrientes no solo, como cálcio (Ca) e magnésio (Mg). A casca de eucalipto contribuiu para o aumento de matéria orgânica, enquanto o lodo da ETE e a lama de cal forneceram nutrientes como fósforo e potássio. A lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) também demonstrou potencial como corretivo do solo, contribuindo para a estabilidade da alcalinidade. Conclui-se que a utilização dos resíduos sólidos industriais nas formulações de fertilizantes organominerais é viável, tanto técnica quanto ambientalmente. A aplicação dos fertilizantes organominerais resultou em uma melhoria significativa no crescimento das plantas e na qualidade do solo, favorecendo o uso sustentável desses resíduos e reduzindo os impactos ambientais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo Kraft	15
Figura 2 – Fluxograma de etapas da metodologia	32
Figura 3 – Resíduos: (a) Casca de eucalipto, (b) Resíduo do lodo da ETE e (c) Lama de Carbonato de Cálcio.....	33
Figura 4 – Formulações T0, T1, T2 e T3.....	37
Figura 5 – Bandeja utilizada para semeadura	38
Figura 6 – Instalação do experimento (a), semeadura (b).....	47
Figura 7 – Cotilédones ao final do experimento	47
Figura 8 – Imagens das medições de cada tratamento.....	48
Figura 9 – Resultados gráficos dos parâmetros de crescimento para cada tratamento (mm).....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais produções mundiais de celulose em 2021	13
Tabela 2 – Produção de rochas no Brasil em 2023.....	19
Tabela 3 – Referências bibliográficas	29
Tabela 4 – Parâmetros para caracterização das amostras	34
Tabela 5 – Tratamentos experimentais (% em massa base seca).....	37
Tabela 6 – Análise granulométrica dos resíduos utilizados nessa pesquisa (gramas em base seca).....	39
Tabela 7 – Análise qualitativa FRX	41
Tabela 8 – Análise granulométrica dos tratamentos (gramas)	42
Tabela 9 – Análise química dos fertilizantes organominerais.....	43
Tabela 10 – Taxa de germinação (%)	48
Tabela 11 – Resultados dos parâmetros de crescimento das plântulas de rúcula para cada tratamento (mm)	49
Tabela 12 – ANOVA aplicado aos resultados do fertilizante organomineral produzido	51

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIOFOM	Biofertilizante Organomineral
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CONCLA	Comissão Nacional de Classificação
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
EUA	Estados Unidos da América
FRX	Fluorescência de Raios-X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Instrução Normativa
LBRO	Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais
LC	Lama de carbonato de cálcio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ONU	Organização das Nações Unidas
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Tema	9
1.2 Delimitação do tema	9
1.3 Problema	9
1.4 Objetivos	10
1.4.1 Objetivo geral	10
1.4.2 Objetivos específicos.....	10
1.5 Justificativa.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Resíduos Sólidos Industriais	11
2.2 Indústria de Celulose e do Papel.....	12
2.2.1 Processo de produção de celulose	14
2.2.2 Resíduos de indústria da celulose.....	16
2.3 Indústria de Rochas Ornamentais	18
2.3.1 Processo de produção de rochas ornamentais	20
2.3.2 Resíduos da indústria de rochas ornamentais	20
2.4 Fertilizantes	23
2.4.1 Classificação	24
2.4.2 Fertilizantes organominerais	25
2.4.3 Uso de resíduos na produção de fertilizantes agrícolas.....	26
2.4.4 Teste com planta.....	30
3 METODOLOGIA	32
3.1 Etapa I – Coleta e Caracterização dos resíduos	32
3.1.1 – Análise granulométrica	34
3.1.2 – Determinação de pH.....	34
3.1.3 – Determinação da condutividade elétrica.....	35
3.1.4 – Determinação do teor de umidade	35
3.1.5 – Fluorescência de raios X.....	36
3.2 Etapa II – Formulações	36
3.3. Etapa III – Caracterização do fertilizante organomineral.....	37
3.4. Etapa IV – Aplicação do fertilizante organomineral (fitometria).....	38
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	39

4.1 Caracterização das matérias-primas	39
4.2 Caracterização dos fertilizantes organominerais	42
4.3 Produção Vegetal.....	46
5. CONCLUSÕES	52
6. TRABALHOS FUTUROS.....	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A crescente valorização do desenvolvimento sustentável pela sociedade tem gerado uma pressão ambiental cada vez maior para aprimorar a eficiência no uso de recursos naturais e promover a redução nas emissões atmosféricas e na produção de resíduos sólidos. Essas preocupações têm sido especialmente direcionadas à cadeia de suprimentos e aos ciclos de vida que envolvem o processamento de minerais e recursos energéticos, devido às emissões de gases, efluentes líquidos e resíduos sólidos nessas etapas (NORGATE; JAHANSHAHI; RANKIN, 2007).

O segmento de celulose e papel tem se destacado como o mais importante do setor florestal e como um dos mais bem-sucedidos da economia brasileira, contribuindo significativamente para o seu desenvolvimento em termos de geração de renda, emprego, imposto e divisas (CARVALHO, 2012).

A indústria de celulose apresenta características singulares, devido ao fato de possuir um elevado nível de desenvolvimento tecnológico que utiliza instalações industriais com grande capacidade de produção, uma ampla base de recursos florestais plantados e intenso capital aplicado em tecnologia.

O Brasil também se destaca como um dos principais produtores mundiais de rochas ornamentais. No processo de produção de chapas, os blocos de rocha são serrados em teares, resultando em aproximadamente 25% de resíduos. Esses resíduos são transformados em uma lama por meio da mistura com água e outros componentes, como granalha de aço e cal, dependendo do sistema de corte utilizado. Posteriormente, essa lama passa por filtros e precisa ser descartada em aterros especializados. Devido à quantidade significativa de resíduos gerados e aos desafios e custos associados ao seu descarte.

A indústria de celulose e de rochas ornamentais geram elevadas quantidades de resíduos sólidos industriais que ainda tem destinação para aterros. Considerando isso, é de grande importância estudos de aproveitamento destes resíduos para uma destinação correta. O Brasil como um dos maiores produtores de celulose e de rochas ornamentais, deve se aprofundar em estudos sobre a utilização de resíduos destas indústrias.

A crescente demanda por fertilizantes agrícolas e os problemas ambientais decorrentes do uso excessivo de produtos químicos têm levado à busca por alternativas mais sustentáveis. Uma solução promissora é a utilização de resíduos

industriais na produção de fertilizantes organominerais, promovendo a gestão eficiente de resíduos na indústria, ao mesmo tempo em que atende às necessidades dos produtores agrícolas e do meio ambiente.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo a desenvolvimento e a avaliação de um fertilizante organomineral gerado a partir de resíduos da indústria da celulose e da indústria do beneficiamento de rochas ornamentais. O projeto foi realizado em escala laboratorial através do método de testagem de tratamentos com doses crescentes de composto organomineral.

1.1 Tema

O tema proposto para este trabalho é o desenvolvimento e análise de fertilizantes organominerais gerados a partir de resíduos sólidos da indústria de celulose e da indústria de rochas ornamentais para aplicação na agricultura.

1.2 Delimitação do tema

O estudo foi realizado com resíduos gerados no processo de fabricação de celulose e papel, proveniente de uma unidade industrial localizada na cidade de Guaíba, no estado do Rio Grande do Sul, nomeadamente, CMPC, e com o resíduo da lama do beneficiamento de rochas ornamentais, nomeadamente, Ranzan, localizada na cidade de São Leopoldo. Este trabalho será limitado a escala laboratorial.

1.3 Problema

Tendo em conta que os setores da celulose e papel e das rochas ornamentais são geradores de elevados quantitativos de resíduos sólidos industriais, orgânicos e inorgânicos, a concepção de um composto utilizando estes resíduos acarreta uma redução de impactos ambientais e possivelmente a conservação de recursos naturais não renováveis utilizados na produção de fertilizantes.

1.4 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são definidos em objetivo geral e específicos.

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é a valorização dos resíduos gerados na indústria da celulose e do beneficiamento das rochas ornamentais através do desenvolvimento de um composto organomineral.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Analisar as características dos resíduos sólidos industriais testados;
- b) Desenvolver um fertilizante organomineral a partir de casca de eucalipto, lodo da ETE, lama de carbonato de cálcio e lama do beneficiamento de rochas ornamentais;
- c) Avaliar a produção vegetal utilizando o fertilizante organomineral produzido comparativamente a um fertilizante comercial.

1.5 Justificativa

O presente projeto se justifica pelo elevado volume de resíduos gerados nas indústrias de celulose e rochas ornamentais, que representam um desafio ambiental significativo. A proposta de concepção de um fertilizante organomineral busca transformar esses passivos em soluções úteis, promovendo a valorização dos resíduos industriais e práticas agrícolas mais sustentáveis, contribuindo para a redução de impactos ambientais e a geração de ganhos econômicos. Neste sentido, a proposta é a concepção de um organomineral, oriundo das indústrias de celulose e rochas ornamentais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A bibliografia técnica e científica sobre os resíduos sólidos oriundos de indústrias de celulose e papel dispõe de uma ampla gama de assuntos relacionados. O interesse desse assunto e a sua aplicabilidade podem estar diretamente associados às questões ambientais.

2.1 Resíduos Sólidos Industriais

No Brasil foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei nº 13.305 de 2 de agosto de 2010, que dispõe sobre os instrumentos necessários para o correto gerenciamento dos resíduos sólidos, e tem entre os objetivos: a gestão integrada dos resíduos; a redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos e o incentivo a indústria da reciclagem fomentando o uso de matérias-primas e insumos de materiais recicláveis e reciclados. (BRASIL, 2010).

A Lei nº 12.305/2010 define resíduos sólidos como:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

O gerenciamento de resíduos é definido pela mesma Lei como:

“Conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei”.

A reciclagem de resíduos industriais é definida pela mesma Lei como:

“Processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa”.

No estado do Rio Grande do Sul, o Código Estadual do Meio Ambiente, instituído pela Lei nº 11.520, estabelece ao gerador a responsabilidade pelos resíduos produzidos, compreendendo as etapas de acondicionamento, coleta, tratamento e destinação final. A terceirização destas etapas não isenta a responsabilidade do gerador pelos danos que vierem a ser causados. Além disso, o Código Estadual prevê que a responsabilidade do gerador cessará quando estes, após utilização por terceiro, licenciado pelo órgão ambiental, sofrerem transformações que os descaracterizem como tais.

A NBR 10004 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública (ABNT, 2004): podem ser classificados em Classe I – Perigosos, quando apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade; Classe II – A (não perigosos e não inertes) quando apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade; Classe II – B (não perigosos e inertes) quando não se enquadram nas classes anteriores.

Entre as possíveis alternativas para os resíduos sólidos industriais, o desenvolvimento de novos usos dos subprodutos do processo e de tecnologias que revertam o conceito de resíduo para o de matéria-prima é imprescindível para otimizar a eficiência das indústrias, além de reduzir o impacto ambiental.

2.2 Indústria de Celulose e do Papel

A indústria da celulose e do papel é enquadrada na seção C, divisão 17, grupo 17.1 e na classe 17.10-9, que é a classificação dada às empresas responsáveis pela “Fabricação de celulose e outras pastas para a fabricação de papel”, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela Comissão Nacional de Classificação (CONCLA), em sua Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE).

No Brasil, o setor da celulose e do papel é destaque entre os segmentos industriais mais competitivos, em virtude dos altos investimentos praticados e os impactos sobre os setores econômicos. A cadeia produtiva florestal manteve seu comportamento resiliente ajudando o Brasil em um momento tão marcante como a chegada da pandemia de Covid-19 ao país (IBÁ, 2022).

O setor florestal brasileiro contribuiu com o crescimento de 7,5%, em 2021, superior a evolução do PIB nacional, chegando a um recorde na receita bruta de R\$ 244,6 bilhões. Dados indicam que a produção industrial de celulose totalizou, no ano de 2021, 22,5 milhões de toneladas mantendo-se na posição de segundo maior produtor do mundo; já a produção de papel no mesmo período, atingiu uma produção de 10,7 milhões de toneladas, mantendo o mercado doméstico como principal foco das vendas de papel. (IBÁ, 2022).

Além disso, o Brasil se manteve como segundo maior produtor de celulose mundial em 2021, como mostra na Tabela 1. Isso se deve pela larga extensão territorial, condições de clima e solo, da qualidade, origem sustentável e certificada da sua celulose, além dos anos de investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação, técnicas de manejo, melhoramento genético e práticas sustentáveis.

Tabela 1 – Principais produções mundiais de celulose em 2021

Produção de celulose (2021)	
País	Milhões de toneladas
1º EUA	50,9
2º Brasil	22,5
3º Canadá	15,4
4º China	14,9
5º Suécia	12,0

Fonte: Adaptado de IBÁ (2022)

No que se refere as exportações brasileiras de celulose em 2021, essas alcançaram 15,7 milhões de toneladas, sendo os principais destinos China e Estados Unidos, com 43% e 17% das exportações de celulose respectivamente.

Segundo Azevedo *et. al.* (2018), a indústria da celulose e do papel cresce a uma taxa anual de até 30%, devido a este fator, tem por consequência a geração de grande quantidade de resíduos sólidos industriais. Estima-se que 0,4 tonelada de resíduo seja gerada para cada tonelada de papel produzido (TOCZYLOWSKA-MAMINSKA, 2017).

A elevada produção de celulose gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e poluição atmosférica como emissões de dióxido de

carbono, metano e óxido nitroso, causando danos ao meio ambiente. Por isso, ressalta-se a importância da realização desse estudo.

Em 2021, o setor brasileiro apresentou 9,93 milhões de hectares de árvores plantadas, um crescimento de 1,9% em relação ao ano anterior. Entre as espécies, 75,8% da área é composta por cultivo de eucalipto e 19,4% de pinus. Além desses cultivos, estão presentes outras espécies, entre elas a seringueira, acácia, teca e paricá. O Estado do Rio Grande do Sul se destaca pelo cultivo de Acácia (IBÁ, 2022).

A obtenção da celulose é através da madeira em tora, predominantemente em áreas plantadas, sendo as espécies de *Eucalyptus* e *pinus*, majoritariamente, utilizadas como matéria-prima na indústria de papel e celulose (IBÁ, 2022).

2.2.1 Processo de produção de celulose

A produção da polpa de celulose inicia com o preparo da matéria-prima (tora), que compõem os processos de descascamento e picagem, com o intuito de formar fragmentos de madeira denominados de cavacos.

Os processos para a separação da celulose e produção do papel podem ser físicos, mecânicos, biotecnológicos ou químicos. O principal processo de produção da polpa celulósica no mundo é o químico, especificamente, o processo Kraft, que corresponde a 75% de toda a celulose produzida no mundo (BAJPAI, 2015; KINNARINEN et al., 2016).

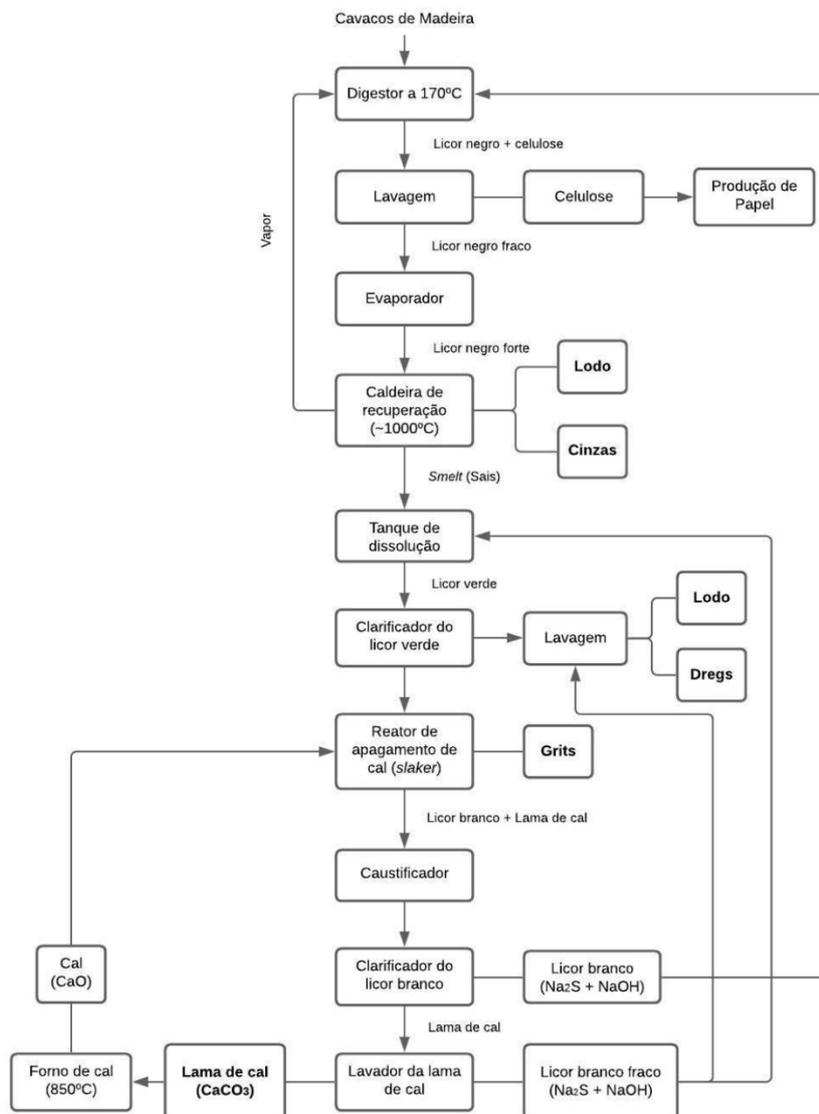
O processo Kraft é o mais utilizado no Brasil para a produção de polpa celulósica, em torno de 81% da produção brasileira. Consiste em um processo químico que utiliza hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) para realizar a deslignificação da celulose (RODRIGUES, 2016).

Algumas vantagens do processo Kraft são ciclos de cozimento mais curtos, grande flexibilidade quanto à madeira utilizada, preserva a resistência das fibras, a polpa pode ser branqueada a altos níveis de alvura, produz polpas de alta resistência e possui um eficiente sistema de recuperação dos reagentes. Porém as desvantagens do processo são o alto custo de implementação, a poluição odorífica, baixo rendimento de polpação e o alto custo de branqueamento (FOELKEL, 2009).

As indústrias que empregam o processo Kraft produzem consideráveis quantidades de resíduos sólidos, o que acarreta elevados custos de disposição em aterros e contribui para um impacto ambiental relevante.

O processo se inicia no beneficiamento da madeira, onde a empresa recebe a madeira, transporta para a fábrica e transforma em cavacos. Após esse processo, os cavacos de madeira são levados ao digestor, onde é formado o licor preto, depois passa pela caldeira, tanque e forma o licor verde. Com este licor, é realizada a clarificação, onde forma os resíduos de dregs e grits. O processo continua para o caustificador e clarificador de licor, onde é formado o licor branco e como resíduo a lama de cal. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo.

Figura 1 – Fluxograma do processo Kraft



Fonte: Adaptado de Modolo (2014)

2.2.2 Resíduos de indústria da celulose

O processo de fabricação de celulose, especialmente no método Kraft, é responsável pela produção de diversos tipos de resíduos, que podem variar de acordo com o tipo de celulose fabricada, as matérias-primas utilizadas e as tecnologias aplicadas no processamento (MODOLO, 2014). Estes resíduos incluem materiais orgânicos e inorgânicos, como casca de madeira, serragem, cinzas de caldeira, lama de cal, dregs, grits e lodos biológicos.

A produção de celulose envolve uma série de etapas complexas, nas quais grandes quantidades de resíduos são geradas. Estes resíduos podem ser classificados de acordo com sua origem e composição, sendo geralmente divididos entre resíduos orgânicos, como casca de madeira e lodo de tratamento de efluentes, e inorgânicos, como a lama de carbonato de cálcio, as cinzas das caldeiras e os dregs (MODOLO, 2014).

Os principais resíduos industriais gerados são resíduos lenhosos como a casca de madeira e a serragem, sólidos alcalinos oriundos do processo de recuperação química do licor negro como os dregs, lama de cal, grits e as cinzas provenientes da combustão na caldeira de recuperação; e por fim lodos primários e biológicos provenientes da estação de tratamento de efluentes (GUERRA, 2007).

Entre os principais resíduos orgânicos gerados estão a casca de eucalipto, a serragem e o lodo biológico. A casca de eucalipto, que pode representar entre 10% e 20% do volume das toras de madeira, é um dos resíduos mais abundantes (MODOLO, 2014). Tradicionalmente, esse material era descartado em aterros, o que gerava preocupações ambientais devido à liberação de metano e dióxido de carbono durante sua decomposição. Entretanto, a casca de eucalipto possui uma alta relação carbono/nitrogênio, o que a torna um material promissor para a produção de compostos orgânicos ou biocombustíveis, além de poder ser utilizada em processos de compostagem.

O lodo de tratamento de efluentes é outro resíduo significativo, durante a produção da celulose são gerados dois lodos distintos, o lodo primário, que é gerado nos clarificadores primários, e o lodo secundário, também chamado de lodo biológico, que resulta do processo de tratamento biológico de efluentes, em maior quantidade no processo de lodo ativado.

Tanto o lodo primário como o lodo secundário são classificados como Classe II A – não inertes pela NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), ou seja, não perigosos (MALAISKIENE et al., 2018). Os principais destinos dos resíduos provenientes do tratamento de efluentes de fabricas de celulose e papel são o aterro, prática está que tem se tornado uma opção onerosa e inviável, visto que além de ocupar grandes extensões de terra, podem promover a poluição de águas subterrânea devido a lixiviação e geração de gases de efeito estufa (LIKON; TREBSE, 2012; PERVAIZ; SAIN, 2015).

O lodo secundário, conhecido como lodo biológico, decorre da formação de microrganismos aeróbicos. O tratamento de efluentes realizado pelas fábricas de celulose e papel é uma etapa importante dentro do processo produtivo de polpa celulósica, visto que o seu lançamento em corpos d'água sem tratamento pode acarretar significantes impactos ambientais negativos afetando o ecossistema aquático (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004).

A aplicação de lodos biológicos na agricultura tem sido estudada como uma forma de reaproveitamento sustentável. Quando devidamente tratado, o lodo pode melhorar as propriedades físicas e químicas do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, além de promover o desenvolvimento de micro-organismos benéficos ao solo (ROSA; LIMA; COLODETTE, 2021). No entanto, é importante que o uso desses lodos seja feito de forma controlada, pois eles podem conter metais pesados e outros contaminantes que, se não tratados adequadamente, podem causar danos ao ambiente, desta forma, se faz necessário um monitoramento contínuo para garantir a segurança do solo e das culturas agrícolas (FAVARO; PANDOLFO; LIMA, 2019).

Entre os resíduos inorgânicos gerados pela indústria de celulose e papel estão as cinzas de caldeira, a lama de cal, os dregs e os grits. As cinzas de caldeira são resultantes da queima de biomassa, que ocorre durante o processo de geração de energia nas fábricas de celulose. Esse material é rico em cálcio, magnésio e potássio, o que lhe confere um grande potencial como corretivo de acidez de solos (CAMPOS; MARTINS; COSTA, 2020). Estudos indicam que a aplicação controlada de cinzas de caldeira em solos agrícolas pode substituir o uso de calcário, oferecendo uma alternativa mais sustentável e econômica para a correção da acidez do solo. No entanto, a presença de metais pesados nas cinzas exige monitoramento constante para garantir que seu uso seja seguro para o meio ambiente.

A lama de cal é outro subproduto importante do processo de produção de celulose. Ela é extraída no processo de clarificação do licor branco. Ela é composta basicamente por carbonato de cálcio (CaCO_3), uma pequena quantidade de carbonato de magnésio (MgCO_3) e outros minerais. Embora parte da lama de cal seja reutilizada no próprio processo produtivo, o excesso desse resíduo ainda representa um desafio para a indústria. Devido ao seu elevado teor de cálcio, a lama de cal tem sido estudada como uma possível alternativa ao calcário agrícola, podendo ser utilizada para melhorar as condições de solos ácidos (MODOLO, 2014). Contudo, a eficiência desse resíduo na agricultura ainda depende de pesquisas adicionais para avaliar seu impacto a longo prazo.

A quantidade significativa de resíduos gerados tem motivado a indústria a buscar soluções que reduzam seus impactos ambientais. Entre as principais preocupações estão o manejo inadequado desses resíduos, que pode levar à contaminação do solo e da água, além da emissão de gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono (AMARAL; SIQUEIRA, 2015). Assim, uma gestão eficaz desses resíduos é crucial para minimizar os danos ambientais e promover o uso sustentável dos subprodutos gerados pela indústria de celulose e papel.

2.3 Indústria de Rochas Ornamentais

Conforme estabelecido pela NBR 6502/1995 (ABNT, 1995), o conceito de rocha refere-se a uma substância sólida composta por um ou mais minerais, cada um apresentando propriedades físicas e mecânicas específicas. Já a NBR 15012/2013 (ABNT, 2013) define a rocha ornamental como um material pétreo natural destinada a ser utilizada em uma variedade de aplicações, tais como revestimentos internos e externos, decoração, móveis, estruturas, elementos arquitetônicos e arte funerária.

Na esfera comercial, os mármore (rochas metamórficas) e os granitos (rochas magmáticas) destacam-se como os principais tipos de rochas ornamentais. No entanto, devido à diversidade e às aplicações desses materiais pétreos, também encontramos os quartzitos, calcários, travertinos, arenitos e ardósias (FRASCÁ, 2014).

Os negócios do setor de rochas ornamentais e de revestimento experimentaram notável expansão no século 21. A produção mundial evoluiu de 60 Mt no ano 2000 para cerca de 170 Mt em 2023, correspondentes a 1,8 bilhão m^2

equivalentes com 2 cm de espessura. No mesmo período, o comércio internacional avançou de 23 Mt para 58 Mt, envolvendo 60% de rochas brutas e 40% de rochas processadas, que teriam gerado transações comerciais de US\$ 20 bilhões em 2022, conforme relatado pela ABIROCHAS (2024).

Os principais produtores mundiais incluem, nesta ordem, China, Índia, Turquia, Brasil e Irã. O Brasil ocupa a posição de quinto lugar em volume físico e faturamento em exportações. Os dez principais destinos das exportações brasileiras de rochas em 2023 incluíram, nesta ordem e em faturamento, EUA, China, Itália, México, Reino Unido, Espanha, Canadá, Argentina, Austrália e Alemanha. O Brasil permanece como principal fornecedor dos Estados Unidos da América (EUA), essencialmente com chapas de granitos e, agora também, de quartzitos. O Brasil consolidou o maior e mais moderno parque mundial de serragem de grandes chapas, ampliando notavelmente sua carteira de materiais e tornando-se o principal fornecedor, conforme já referido, do maior importador mundial de rochas processadas – os EUA.

No Brasil, a região Sudeste se destaca como a principal responsável pela produção de rochas ornamentais, representando 47,50% da produção nacional. Notavelmente, o estado do Espírito Santo contribui significativamente para esse cenário, detendo 26% desse total, sendo reconhecido como um importante polo de extração e beneficiamento de rochas, conforme destacado pela ABIROCHAS (2024).

A produção brasileira de rochas ornamentais se manteve no patamar de 10 Mt em 2023, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Produção de rochas no Brasil em 2023

Tipo de Rochas	Produção (Mt)
Granito e similares	3,8
Mármore e Travertino	2,9
Quartzito Maciço	2,0
Ardósia	0,4
Quartzito Foliado	0,2
Pedra Miracema (Paduana)	0,2
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão, Pedra Morisca)	0,5

Fonte: Adaptado de ABIROCHAS (2024)

2.3.1 Processo de produção de rochas ornamentais

O processamento de rochas ornamentais compreende as etapas de extração e beneficiamento. Antes de proceder ao beneficiamento das rochas ornamentais, é crucial possuir um conhecimento prévio do local da pedreira. Isso se deve ao fato de que as rochas com rachaduras ou falhas no afloramento rochoso tornam-se inadequadas para o processo de mineração (RANA et al., 2016). Portanto, a seleção de uma rocha natural para se tornar uma rocha ornamental depende da sua capacidade de produzir blocos retangulares, além de sua estética, resistência e viabilidade técnica, de modo a requerer o mínimo esforço possível durante os processos de corte e polimento.

O processo de beneficiamento das rochas ornamentais envolve a conversão dos blocos extraídos durante a fase de extração (também conhecida como lavra) em produtos finais ou semiacabados. Esses blocos têm um volume geralmente na faixa de 8 a 15 m³ para garantir o melhor aproveitamento do material durante a fase do beneficiamento (VIDAL et al., 2014). Durante a etapa inicial de beneficiamento, conhecida como serragem ou desdobramento dos blocos, estes são transformados em chapas com diversas espessuras, geralmente variando entre um, dois ou três centímetros.

Posteriormente, ocorre o estágio de polimento e resinagem, no qual as chapas são submetidas a um acabamento superficial, caracterizando o beneficiamento secundário. Durante o corte das peças, uma quantidade significativa de água é utilizada como meio de resfriamento, representando aproximadamente 20 a 40% do bloco extraído da pedreira em forma de lama (ALYAMAÇ; TUGRUL, 2014; MASHALY et al., 2016). Todo esse processo gera um resíduo chamado de lama abrasiva também conhecida como Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO).

2.3.2 Resíduos da indústria de rochas ornamentais

A geração de resíduos é uma consequência natural de qualquer processo de transformação de materiais ou produção. No caso do beneficiamento de rochas ornamentais, essa realidade não é diferente, a geração de resíduos no setor de rochas ornamentais é significativa, e sua gestão inadequada pode acarretar graves problemas ambientais. Os resíduos resultantes desse processo têm impactos

ambientais em várias etapas da produção, como as lamas geradas durante o desdobramento e polimento, os casqueiros e cacos, além de outros resíduos como lâminas e granalhas desgastadas, sacos de cimento e cal, e restos de pastilhas abrasivas, entre outros.

As lamas, casqueiros e fragmentos gerados durante o corte e polimento das rochas constituem os principais resíduos, que, quando descartados diretamente no meio ambiente, podem causar impactos como degradação do solo, contaminação de recursos hídricos e alteração das paisagens naturais (VENTUROTÍ et al., 2019).

A quantidade de resíduos gerados no beneficiamento das rochas ornamentais depende da natureza geológica, textura e petrografia da rocha, bem como das máquinas de corte e processamento, da capacidade da planta e das dimensões dos blocos a serem produzidos (KARACA *et al.*, 2012). Esses fatores influenciam diretamente não só na quantidade de resíduos gerados, mas também na composição desses resíduos, o que traz implicações tanto para a gestão quanto para as soluções de reaproveitamento sustentável desses materiais.

Denominada como lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO), essa lama tem dois destinos possíveis: pode ser drenada para tanques de sedimentação, visando recuperar os sólidos depositados no fundo do tanque (RANA et al., 2016), ou descartada em poços de sedimentação escavados no solo (COSME; TEIXEIRA; CALMON, 2016). A água que contém partículas com diâmetros entre 1 e 60µm pode infiltrar e obstruir os poros do solo, prejudicando sua permeabilidade, fertilidade e as águas subterrâneas (GALETAKIS; SOULTANA, 2016; KOBETIČOVÁ; ČERNÝ, 2017; VENTUROTÍ et al., 2019). Essa obstrução pode alterar o ciclo hidrológico local, aumentando o risco de enchentes e prejudicando o reabastecimento dos lençóis freáticos (GALETAKIS; SOULTANA, 2016).

A LBRO, resultante do processo de polimento das rochas neste estudo, apresenta uma diversidade de composições químicas. Essa heterogeneidade está relacionada a cada unidade de processamento das pedras, onde diferentes quantidades e tipos de rochas são utilizados. Os granitos e os basaltos são compostos predominantemente de quartzo (SiO₂), enquanto os mármore são compostos principalmente de calcita (CaCO₃).

A LBRO é composta principalmente por partículas de rochas suspensas em água, contendo fragmentos minerais como quartzo, feldspato, calcita e, em menor grau, outros minerais presentes na composição das rochas processadas

(KOBETIČOVÁ; ČERNÝ, 2017). Essa diversidade mineralógica faz com que os resíduos tenham potenciais diferentes de reaproveitamento dependendo de sua origem, com impactos que variam de acordo com o tipo de rocha processada.

Por fim, no contexto da classificação ambiental, há um consenso entre os autores de que a LBRO é considerada um resíduo inerte, uma conclusão corroborada por análises mineralógicas, conforme Uliana et al. (2015), Sadek, El-Attar e Ali (2016) e Mittri et al. (2018).

Embora a lama seja considerada um resíduo inerte, ou seja, não gera reações químicas ou emissões tóxicas significativas, sua disposição deve seguir normas ambientais rígidas para evitar danos ao meio ambiente. Conforme demonstrado por Uliana et al. (2015), a inércia química da LBRO não elimina a necessidade de se tratar a questão de sua disposição de forma responsável, dado o volume considerável produzido. Isso é especialmente importante no contexto de regiões onde a produção de rochas ornamentais é intensa e contínua, o que acentua o desafio de gerenciar grandes volumes de resíduos de maneira sustentável.

Nos últimos anos, a pesquisa tem se voltado para alternativas de reaproveitamento dos resíduos gerados pela indústria de rochas ornamentais, com foco na redução dos impactos ambientais e no aproveitamento econômico desse material. Uma das principais abordagens tem sido a utilização da lama resultante do beneficiamento como matéria-prima para a fabricação de materiais de construção, como tijolos, argamassas e concretos. Estudos mostram que a adição de resíduos de rochas ornamentais pode melhorar algumas propriedades desses materiais, como resistência mecânica e durabilidade, além de reduzir a necessidade de extração de recursos naturais virgens (MITTRI et al., 2018). Esse tipo de abordagem oferece uma solução dupla: além de mitigar o impacto ambiental do descarte inadequado de resíduos, contribui para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis, com menor pegada ecológica e menor consumo de recursos não renováveis.

Outras aplicações sugeridas para a LBRO incluem o uso como corretivo de solos ácidos, devido à presença de calcita nos resíduos de mármore, ou como aditivo em misturas asfálticas e pavimentação. A pesquisa de Rana et al. (2016) demonstrou que a lama pode ser incorporada a misturas de concreto sem comprometer sua qualidade, o que abre um novo campo de aplicação para esses resíduos. Entretanto, a viabilidade econômica dessas alternativas ainda depende da localização das plantas de processamento e do custo de transporte dos resíduos para os locais de aplicação.

Esse aspecto econômico é fundamental para determinar a viabilidade de qualquer solução de reaproveitamento, já que o transporte de resíduos é um fator significativo no custo final de qualquer aplicação.

Diante desse cenário, é fundamental que as indústrias de rochas ornamentais adotem práticas de gestão integrada dos resíduos, promovendo a redução na geração de resíduos na fonte, o reaproveitamento e a reciclagem dos materiais, além de garantir o correto descarte dos resíduos não recicláveis. A implementação de tecnologias mais eficientes de corte e polimento também pode contribuir para a redução do volume de resíduos gerados.

Conforme destacado por Venturoti et al. (2019), a sustentabilidade na indústria de rochas ornamentais depende diretamente de uma gestão eficaz dos resíduos e da adoção de práticas que promovam o uso circular dos materiais. Isso implica não apenas em inovações tecnológicas no processo de beneficiamento, mas também em políticas públicas que incentivem a adoção de práticas mais sustentáveis por parte das empresas do setor.

2.4 Fertilizantes

A Organização das Nações Unidas (ONU) projetou que a população humana deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050 (UNITED NATIONS, 2019). Considerando essa estimativa, a produção de alimentos deve acompanhar o crescimento para suprir a futura demanda. O setor agrícola será o de maior influência em relação a produção e entrega de alimentos, e o aumento deve acontecer por intensificação, ou seja, aumento no rendimento das safras, ao invés de expansão da área plantada (KOPITTKKE et al., 2019).

O rendimento das safras é influenciado por diversos fatores, sendo eles: clima, tipo de solo, controle de pragas e ervas daninhas, uso de fertilizantes, entre outros (NKURUNZIZA et al., 2020). O manejo adequado dos fertilizantes agrícolas é um dos fatores importantes para a segurança alimentar, visto que sua aplicação no solo pode provocar uma série de problemas ambientais.

De acordo com a legislação brasileira, conforme definido pelo decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, fertilizante é “substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes de plantas”. A sua função é repor ao

solo os elementos retirados, com a finalidade de manter e ampliar seu potencial produtivo (DIAS, 2006).

2.4.1 Classificação

Segundo o Decreto nº 4.954 de 14 de janeiro de 2004, que regulamenta a Lei nº 6.894/1980, os fertilizantes são classificados em diferentes categorias, como descrito na sequência:

- a) Fertilizante mineral;
- b) Fertilizante orgânico;
- c) Fertilizante mononutriente;
- d) Fertilizante binário;
- e) Fertilizante ternário;
- f) Fertilizante com outros macronutrientes;
- g) Fertilizante com micronutrientes;
- h) Fertilizante mineral simples;
- i) Fertilizante mineral misto;
- j) Fertilizante mineral complexo;
- k) Fertilizante orgânico simples;
- l) Fertilizante orgânico misto
- m) Fertilizante orgânico composto;
- n) Fertilizante organomineral.

O desenvolvimento de novos produtos pode auxiliar na intensificação da produção agrícola, e diminuir os impactos ambientais a serem causados (KOPITKE et al., 2019). Diversos estudos vêm demonstrando possíveis alternativas para os fertilizantes minerais comerciais, como o uso dos fertilizantes orgânicos e dos fertilizantes organominerais. Sendo assim, o desafio baseia-se em gerenciar corretamente a fertilização do solo para que as demandas alimentares sejam atendidas, e de modo que o solo continue saudável para continuar produzindo e gerando o menor impacto ambiental possível.

2.4.2 Fertilizantes organominerais

Os fertilizantes organominerais são a combinação da matéria orgânica e minerais, sendo de natureza fundamentalmente orgânica, obtidos através de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais (BRASIL, 2009).

Diversos produtos podem ser incorporados na produção desses fertilizantes, como biomassas, resíduos urbanos, resíduos rurais (cama de frango, esterco suíno e bovino), resíduos industriais, entre outros. A utilização de fertilizantes organominerais pressupõe uma demanda crescente por ser um método mais sustentável e podendo trazer uma maior produtividade.

A Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020, trouxe a classificação dos fertilizantes orgânicos de acordo com as matérias-primas utilizadas em sua produção, sendo definido no Art. 3, I – Classe A: “ produto que utiliza, em sua produção, matéria-prima gerada nas atividades extrativas, agropecuárias, industriais, agroindustriais e comerciais, incluindo aquelas de origem mineral, vegetal, animal, lodos industriais e agroindustriais de sistema de tratamento de águas residuárias com uso autorizado pelo Órgão Ambiental, resíduos de frutas, legumes, verduras e restos de alimentos gerados em pré e pós-consumo, segregados na fonte geradora e recolhidos por coleta diferenciada, todos isentos de despejos ou contaminantes sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura”.

Nele consta no Art. 9, que os fertilizantes organominerais devem apresentar, no mínimo: 8% de carbono orgânico; umidade máxima de 20%; CTC de 80 mmolc/kg; 5% para misturas de macronutrientes primários (NPK, NP, NK ou PK) e 3% para misturas de macronutrientes secundários.

O fertilizante organomineral possui características de ambos os fertilizantes, tanto orgânicos quanto minerais. A principal característica está na baixa perda de nutrientes devido à utilização de matéria orgânica em sua composição. Apresenta um maior aproveitamento do fertilizante no solo, reduzindo os gastos com esse insumo.

Além disso, os fertilizantes organominerais apresentam características de grande interesse agrônomo, conforme descritos na literatura: promovem redução da adsorção do fósforo, por propiciarem uma melhoria na interação planta-mineral (PARENT; KHIARI; PELLERIN, 2002); e apresentam melhor taxa de mineralização, principalmente para nutrientes como potássio, nitrogênio e fósforo, sendo essa uma

característica de baixa eficiência dos adubos orgânicos (FERNANDES; TESTEZLAF, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2009) .

A aplicação de fertilizantes organominerais pode promover o melhor desenvolvimento radicular, recuperação da microbiota do solo, diminui o risco de erosão, redução da acidificação do solo e aumento da retenção de água no solo. Sendo assim, os fertilizantes organominerais são uma excelente opção para a redução do uso de fertilizantes minerais e a correta utilização de resíduos providos de diversos setores, como industrial, agropecuário e urbano.

Conforme Ribeiro (2017), estudos sobre utilização de resíduos na formação de substratos destinados à produção de mudas tem sido frequente na literatura nacional e internacional. A utilização dos resíduos da indústria da celulose e papel tem grande potencial para esse fim devido as grandes quantidades de resíduos gerados na indústria e a visível variedade de minerais encontrados nesses resíduos.

Segundo Sacramento (2020), onde utilizou para a produção do composto o lodo biológico, resíduo proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Após análise química do composto, foi possível notar a grande quantidade de minerais presente, principalmente nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) que são muito utilizados na agricultura como adubo. O trabalho concluiu apresentando resultados positivos no crescimento vegetal, onde apresentou um maior incremento de biomassa nas plantas que utilizaram tratamento com o composto orgânico produzido a partir do lodo da celulose.

Toledo (2015) avaliou o composto orgânico oriundo de diferentes resíduos do processo de fabricação de celulose. O composto orgânico utilizado no trabalho era formado pelos seguintes resíduos: 58% de lodo, 9% Dregs, 25% casca de eucalipto, 3,4% grits e 4,5% cinzas. A análise química do composto também apresentou grandes quantidades de minerais com possível destinação para uso na agricultura. Como resultado, a maior quantidade deste composto nos tratamentos, 40:60 e 20:80 (substrato:composto), apresentou maior qualidade na produção vegetal.

2.4.3 Uso de resíduos na produção de fertilizantes agrícolas

Com o aumento da consciência ambiental em todo o mundo, há uma crescente necessidade de desenvolver alternativas na agricultura que permitam a reutilização e reciclagem de materiais. Nesse sentido, os fertilizantes organominerais emergem

como uma estratégia importante, pois a utilização de resíduos industriais e urbanos na sua produção pode diminuir os custos associados à sua eliminação, reduzir a dependência de fertilizantes minerais e mitigar os danos causados pelo acúmulo desses produtos no meio ambiente.

Com base na pesquisa de Audu (2015), um fertilizante organomineral formulado com uma proporção de N:P:K (9:3:3), composto por ureia, fosfato de rocha, cinza de madeira, semente de neem, farinha de sangue, farelo de caroço de algodão, esterco e excrementos de aves, foi investigado. O emprego desse fertilizante no cultivo de arroz demonstrou ter um impacto significativo em todos os parâmetros de crescimento, além do aumento nutricional do solo demonstrando o potencial para a melhora da fertilidade do solo.

Os estudos conduzidos por Ayeni (2012) corroboraram com a melhoria da fertilidade do solo através do uso de fertilizantes organominerais. Conforme demonstrado em seu experimento, a inclusão de uma pequena quantidade de fertilizante NPK (15:15:15) ao fertilizante organomineral pode promover uma mineralização precoce dos nutrientes.

Os fertilizantes organominerais, provenientes de lodo de tratamento de esgoto e que foram aprimorados com a inclusão de fertilizantes minerais, quando tratados adequadamente para estabilização biológica, desinfecção, redução de metais pesados e contaminantes, controle de umidade, entre outras análises para tornar o lodo de tratamento de esgoto seguro para a sua utilização, são apropriados para uso no solo e demonstram uma produtividade comparável à dos fertilizantes convencionais. Um dos principais benefícios do fertilizante organomineral derivado de biossólidos é a sua capacidade de liberar nutrientes de forma gradual, graças ao substancial aumento da matéria orgânica no solo (Kominko et al., 2017).

De acordo com Bello (2014), a compostagem de fosfatos naturais com resíduos agrícolas pode potencializar a solubilidade dos fosfatos, variando conforme o tipo de matéria orgânica utilizada e a velocidade de decomposição.

Tejada (2005) realizou uma comparação entre os efeitos do tratamento do solo utilizando fertilizantes inorgânicos, matéria orgânica como produtos separados e fertilizantes organominerais (utilizando turfa com base em ácidos húmicos e fertilizantes minerais como ureia, fosfato monoamônico e cloreto de potássio). Sua pesquisa revelou que os fertilizantes inorgânicos apresentaram uma perda de nitrogênio 16,1% maior em comparação com a aplicação conjunta de fertilizantes

inorgânicos e orgânicos. Este padrão de perda também foi observado em outros macronutrientes e micronutrientes.

No Brasil, o biofertilizante organomineral (BIOFOM) foi desenvolvido a partir de resíduos da indústria sucroalcooleira. O processo de fabricação do fertilizante organomineral sólido granulado envolve a combinação da torta de filtro, cinzas de caldeira e fuligem, juntamente com vinhaça modificada contendo fontes minerais de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Pesquisas demonstraram a eficácia e viabilidade econômica do BIOFOM, com a adubação resultando em um aumento de quatro vezes na produção de matéria seca. O teor de N, P e K nas partes aéreas das plantas testadas aumentou mais de 6, 9 e 12 vezes, respectivamente, em comparação com o controle. Os fertilizantes organominerais também contribuíram para o aumento da produtividade das culturas, melhorando as propriedades físico-químicas do solo, sua capacidade de troca catiônica e porosidade. O tratamento com BIOFOM resultou em um maior acúmulo de fósforo nas partes aéreas das plantas em comparação com o controle. Além disso, parte do fósforo presente no BIOFOM não estava disponível durante 45 dias após a aplicação, o que confirma a liberação lenta de nutrientes pelos fertilizantes organominerais (OLIVÉRIO, 2011).

O uso de fertilizantes minerais oferece uma solução de curto prazo para melhorar a produtividade do solo, pois liberam nutrientes rapidamente, proporcionando um efeito imediato nas plantas. No entanto, uma das limitações dos fertilizantes minerais é que eles podem ser facilmente lixiviados, especialmente em solos arenosos ou em regiões com chuvas intensas. Isso significa que, apesar de aumentarem rapidamente a disponibilidade de nutrientes, eles podem exigir aplicações frequentes para manter a fertilidade do solo, o que aumenta os custos e pode gerar impactos ambientais, como a contaminação de águas subterrâneas.

Entretanto, os fertilizantes organominerais, por sua vez, combinam a eficiência dos nutrientes minerais com a matéria orgânica, que atua como um veículo de liberação lenta. Essa característica é conhecida como liberação gradual ou liberação lenta de nutrientes. Com ela, os nutrientes são disponibilizados ao longo do tempo, permitindo uma nutrição mais equilibrada para as plantas e uma menor necessidade de reaplicação frequente. Esse processo não só melhora a eficiência dos nutrientes no solo, mas também contribui para a estruturação e conservação do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e nutrientes e promovendo a atividade microbiana benéfica (KOMINKO et al., 2017).

Embora haja uma escassez de informações sobre as propriedades físicas dos fertilizantes organominerais, entender a relação entre essas propriedades e o conteúdo de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), o tipo de matéria orgânica e o processo de produção é crucial para prever seu comportamento durante o transporte, armazenamento e manuseio. As propriedades físicas também desempenham um papel importante no controle do tempo e da taxa de dissolução dos grânulos, influenciando diretamente a difusão dos nutrientes.

A tabela a seguir apresenta uma síntese dessas pesquisas, destacando os tipos de resíduos utilizados, os produtos formulados e os principais resultados encontrados. A Tabela 3 ilustra as contribuições de diferentes autores, reforçando a relevância do reaproveitamento de resíduos no desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o manejo agrícola e ambiental.

Tabela 3 – Referências bibliográficas

Referência	Resíduos utilizados	Produto Formulado	Principais resultados
Audu (2015)	Uréia, fosfato de rocha, cinza de madeira, semente de neem, farinha de sangue, farelo de caroço de algodão, esterco de vaca e aves.	Fertilizante organomineral	Aumento significativo no crescimento e rendimento do arroz
Ayeni (2012)	Resíduos orgânicos domésticos com a adição de fertilizantes minerais	Fertilizante orgânico "Sunshine"	O uso de fertilizantes organominerais aumentaram significativamente a produtividade do milho e melhoraram as propriedades químicas do solo (pH, matéria orgânica, N, P, K). O organomineral mostrou ser a alternativa mais eficiente e sustentável para solos
Kominko (2017)	Lodo de esgoto tratado com adição de fertilizantes minerais ou outros resíduos (gesso, pó de forno de cimento, pó de forno de cal, ácido fosfórico residual)	Fertilizante organomineral (OMF)	O OMF apresentou liberação gradual de nutrientes. Proporcionam respostas de rendimento de culturas semelhantes aos fertilizantes convencionais. A aplicação de OMFs ao solo aumenta a matéria orgânica e o nitrogênio mineral do solo
Sacramento (2020)	Lodo biológico da estação de tratamento de efluentes de indústria celulósica	Composto orgânico	A dose mais alta do composto orgânico proporcionou o maior incremento na biomassa seca do crambe.

Tejada (2005)	Base de ácidos húmicos derivados da turfa, combinados com fertilizantes minerais (como ureia, fosfato monoamônico e cloreto de potássio)	Fertilizante organomineral (OMF)	O produto OMF apresentou menores perdas por lixiviação comparado a mistura orgânica e inorgânica (O+IF), além de se demonstrar eficaz para reduzir o risco de eutrofização
Toledo (2015)	58% de lodo, 9% de Dregs, 25% de casca de eucalipto, 3,4% de grits e 4,5% de cinzas.	Composto orgânico	Proporções com 40:60 e 20:80 (substrato base:composto orgânico) Mudanças de Eucalyptus com qualidade superior
Olivério (2011)	Vinhaça, torta de filtro, cinza e fuligem com adição de fertilizantes químicos	Biofertilizante organomineral (BIOFOM)	O BIOFOM teve ganhos nas propriedades físico-químicas do solo, da CTC e porosidade, demonstrou ter liberação lenta de nutrientes. Além de ser economicamente viável e sustentável

Fonte: Elaborado pela autora.

2.4.4 Teste com planta

A rúcula (*Eruca sativa*) pertence à família Brassicaceae e é nativa da região do Mediterrâneo. Essa planta é amplamente cultivada em várias partes do mundo, sendo conhecida por suas folhas picantes e sabor marcante, muito utilizadas em saladas e pratos diversos. A variedade "Rokita" é uma das cultivares de rúcula que apresenta características de rápido crescimento e alta adaptabilidade a diferentes condições de cultivo, o que a torna uma escolha comum para pesquisas agrônomicas. Essa planta possui um ciclo de vida curto, o que facilita experimentos agrícolas com resultados em curto prazo (FAQUIN, 2005).

Além disso, existem uma série de características que a tornam ideal para a avaliação de fertilizantes organominerais. Primeiramente, a planta possui um ciclo rápido de crescimento, permitindo uma análise mais ágil dos efeitos dos fertilizantes no desenvolvimento vegetal. Ademais, a rúcula é sensível às variações nas condições do solo e à disponibilidade de nutrientes, o que facilita a observação das respostas da cultura às diferentes formulações testadas.

A rúcula demanda nutrientes essenciais, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), além de micronutrientes como cálcio e magnésio, para um crescimento vigoroso. A aplicação de resíduos industriais, como lama de carbonato de cálcio e lodo da ETE, pode fornecer esses nutrientes de maneira equilibrada. Esses resíduos são ricos em minerais e matéria orgânica, que auxiliam no desenvolvimento radicular e na recuperação da microbiota do solo, o que os torna promissores para a produção da rúcula Rokita.

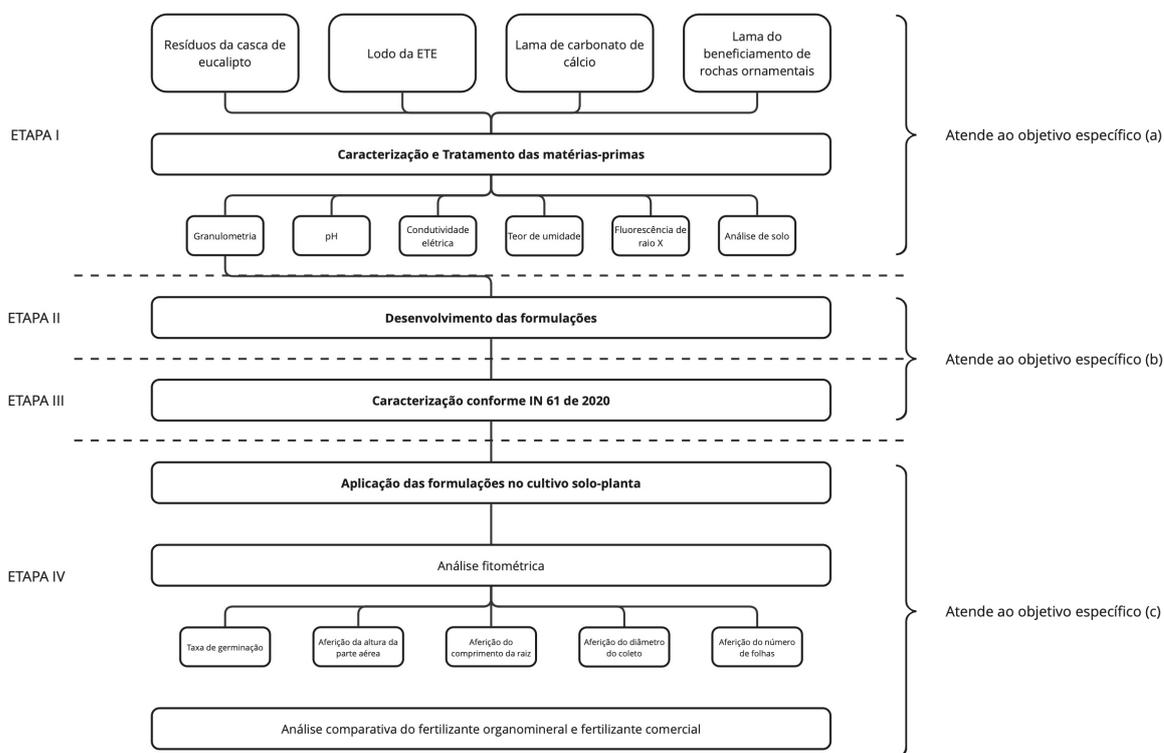
Outra razão para a escolha desta rúcula é sua ampla relevância no cenário agrícola. Trata-se de uma hortaliça amplamente cultivada e consumida, o que garante que os resultados obtidos possam ter aplicação prática para produtores. A facilidade de manejo da planta, tanto em campo quanto em condições controladas, também contribuiu para sua seleção, permitindo um acompanhamento preciso dos efeitos dos tratamentos.

Por fim, a rúcula é uma hortaliça de alto valor nutricional e econômico, sendo um cultivo de interesse tanto para pequenos quanto para grandes produtores. Esses fatores tornam a rúcula Rokita uma cultura adequada para a avaliação da eficácia de fertilizantes organominerais, permitindo a obtenção de dados relevantes tanto para a ciência quanto para a prática agrícola.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para esse trabalho foi composta por quatro etapas, primeiramente foram analisadas características dos resíduos sólidos industriais gerados na indústria de celulose e papel e de beneficiamento de rochas ornamentais, após foi definido as formulações para a produção do fertilizante organomineral, em seguida a análise e caracterização do fertilizante organomineral, posteriormente feito a avaliação da produção vegetal utilizando o fertilizante produzido a partir dos resíduos da casca de eucalipto, lodo da ETE, lama de cal e LBRO. O fluxograma da metodologia utilizada é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de etapas da metodologia



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Etapa I – Coleta e Caracterização dos resíduos

Para o desenvolvimento desta pesquisa, os materiais utilizados foram os resíduos de casca de eucalipto, lodo da estação de tratamento de efluentes e a lama de carbonato de cálcio, provenientes da indústria de papel e celulose, localizada em Guaíba, no estado do Rio Grande do Sul. Ambos estão ilustrados na Figura 3. A lama

do beneficiamento de rochas ornamentais foi cedida pela empresa Ranzan Mármore e Granitos, localizada na cidade de São Leopoldo, no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 3 – Resíduos: (a) Casca de eucalipto, (b) Resíduo do lodo da ETE e (c) Lama de Carbonato de Cálcio



Fonte: Registrada pela autora.

A amostragem do resíduo da casca de eucalipto foi realizada pelo método de amostragem em montes ou pilhas de resíduos conforme descrito na NBR 10007/2004 (ABNT, 2004). Foram coletadas amostras de pelo menos três seções (do topo, do meio e da base). Em cada seção, foram coletadas quatro alíquotas, equidistantes. O amostrador penetrou obliquamente nos montes ou pilhas.

As análises de caracterização foram realizadas com base na Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020. Os ensaios de caracterização que foram realizados com os resíduos foram granulometria, pH, teor de umidade, Fluorescência de raios-X qualitativo (FRX).

A Tabela 4 apresenta um resumo das análises de caracterização realizadas com base em características/propriedades importantes para as amostras, instruções normativas aplicadas a fertilizantes organominerais e conforme a literatura existente sobre o assunto.

Tabela 4 – Parâmetros para caracterização das amostras

Análise	Método/Instrumento	Amostras				
		Casca de Eucalipto	Resíduo do lodo da ETE	Lama de Cal	LBRO	Fertilizante Organomineral
Análise granulométrica	Peneiras (IN nº 61/2020)	✓	✓	✓	✓	✓
pH	EPA 9045D	✓	✓	✓	✓	✓
Condutividade elétrica	IN SDA nº 17	✓	✓	✓	✓	
Teor de umidade	CEN/TS 14774-1:2004	✓	✓	✓	✓	
Fluorescência de raios X (FRX)	Espectrômetro de fluorescência de raio X	✓	✓	✓	✓	
Análise de Solo	TEDESCO (1995)					✓

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.1 – Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada por meio de um conjunto de peneiras com malhas de tamanhos variados acoplado a uma mesa vibratória, durante um período de 10 minutos a 15 rpm. Pesando-se a massa retida em cada peneira e retida ao fundo, expressa-se cada fração em termos percentuais. Realizado em duplicata.

A IN nº 61/2020 traz a especificação dos fertilizantes, de acordo com a sua natureza física, sendo para sólidos as especificações de granulado (peneiras 4,80mm; 2,0mm; 1,0mm), pó (peneiras 2,0mm; 0,84mm; 0,3mm) ou farelado (peneira 4,80mm; 2,83mm; 0,50mm).

3.1.2 – Determinação de pH

O pH das amostras foi medido no Laboratório de Análises Ambientais, com o método descrito no EPA 9045D, com o preparo da amostra seca.

As amostras de Casca de Eucalipto e Lodo da ETE foram preparadas com 20 gramas de amostras e 40 ml de água reagente, após agitadas continuamente no agitador por 5 minutos, seguido pela centrifugação a 2500 rpm por 10 minutos e

realizada a medição do pH. Conforme descrito no EPA 9045D, se os resíduos forem higroscópicos e absorverem toda a água reagente, recomeça o experimento usando 20 g de resíduos e 40 mL de água reagente.

As amostras de Lama de Cal e LBRO foram preparadas com 20 gramas de amostras e 20ml de água, após foram agitadas continuamente no agitador por 5 minutos, seguido pela centrifugação a 2500 rpm por 10 minutos e realizada a medição do pH. Realizado em duplicata.

O pH das amostras foi determinado utilizando-se pHmetro de bancada modelo TEC-5, da marca Tecnal.

3.1.3 – Determinação da condutividade elétrica

A determinação da condutividade elétrica foi realizada para avaliar o conteúdo de eletrólitos solúveis em água nas amostras. Baseada no método descrito no EPA 9045D, segue o mesmo procedimento inicial da análise do pH. A condutividade elétrica do filtrado foi determinada em condutivímetro, também calibrado, sendo o equipamento da marca brasileira Digimed, modelo DM 31. O experimento foi realizado em duplicata.

3.1.4 – Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi determinado pelo método de secagem em estufa, baseia-se na remoção da água por aquecimento. Os cadinhos com as amostras de Lama de Cal e LBRO foram levados para estufa a 105°C por 24 horas, conforme descrito na NBR 6457/1986 (ABNT, 1986). Os cadinhos com as amostras de Casca de Eucalipto e Lodo da ETE foram levados para estufa a 42°C por 72 horas. O ensaio foi realizado em triplicata. O teor de umidade foi determinado por meio da Equação 1.

Equação 1 – Teor de umidade

$$U = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa úmida}} \times 100$$

3.1.5 – Fluorescência de raios X

A análise de fluorescência de raios X (FRX) têm como objetivo determinar os elementos químicos presentes na amostra por meio da incidência de raios X. Foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat), pelo equipamento PANalytical modelo Épsilon 1. Para esta análise, são utilizadas de 1 a 10 gramas de amostra, previamente seca em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$.

O ensaio foi realizado em via única de forma qualitativa e os resultados são expressos em elementos majoritários ($>50\%$), menor quantidade ($5\% < x < 50\%$) e elementos traços ($<5\%$).

3.2 Etapa II – Formulações

A dosagem das misturas resultantes foi calculada e refinada de acordo com parâmetros utilizados na literatura, a fim de se obter as características desejadas do fertilizante organomineral, além de buscar ao máximo o aproveitamento dos resíduos sólidos industriais.

Após os resíduos terem sido devidamente caracterizados, foram determinadas as 4 formulações (% em massa) para a produção do fertilizante organomineral experimentais apresentadas na Tabela 5. A formulação TC indica o fertilizante organomineral comercial fornecido pela empresa VidaE, com características de 50% resíduo da casca de eucalipto e 50% de resíduos do loto da estação de tratamento de efluentes (% de massa seca). O Tratamento T0 tem as mesmas formulações do TC para análise comparativa, e os demais tratamentos tem a adição dos resíduos de lama de carbonato de cálcio e lodo do beneficiamento de rochas ornamentais.

Tabela 5 – Tratamentos experimentais (% em massa base seca)

Tratamento	Casca de eucalipto	Lodo da ETE	Lama de cal	LBRO
TC*	50	50	0	0
T0	50	50	0	0
T1	47	47	3	3
T2	45	45	5	5
T3	43	43	7	7

Fonte: Elaborado pela autora.

*TC = fertilizante organomineral comercial

3.3. Etapa III – Caracterização do fertilizante organomineral

As amostras produzidas foram submetidas a caracterização sob aspectos gerais de fertilizantes organominerais, visto que esta é a aplicação sugerida e avaliada neste estudo. As amostras foram caracterizadas no Laboratório de Análises do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

A Figura 4 apresenta as amostras das formulações preparadas para o experimento.

Figura 4 – Formulações T0, T1, T2 e T3



Fonte: Registrada pela autora.

3.4. Etapa IV – Aplicação do fertilizante organomineral (fitometria)

O fertilizante organomineral produzido foi testado no cultivo com planta para uma posterior avaliação do desempenho da planta em função da adição do fertilizante organomineral. Foi utilizado uma bandeja de isopor para mudas, conforme Figura 5, com a capacidade de 200 células, com tamanho de célula de 28mm x 28mm.

Figura 5 – Bandeja utilizada para sementeira



Fonte: Compra efetuada no Mercado Livre.

O experimento foi conduzido em escala laboratorial para os quatro tratamentos (T0, T1, T2 e T3). Foram efetuadas repetições em 40 células para cada tratamento, durante o período de 10 dias. As células foram preenchidas com 10 gramas de cada material/tratamento. Na parte central de cada célula foi aberta uma cava onde foi inserida uma semente de *Eruca sativa* Mill, espécie popularmente conhecida como Rúcula Rokita. Ao final do experimento, foi analisada a taxa de germinação nas células e as características morfológicas, como altura (H), diâmetro do coleto (DC) e registro do comprimento das raízes (CR) das plântulas.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seção de análise e discussão dos resultados desta dissertação representa o resultado de uma pesquisa abrangente, envolvendo revisão bibliográfica, realização do experimento, além da coleta e interpretação crítica dos dados.

4.1 Caracterização das matérias-primas

A Tabela 6 apresenta a análise granulométrica dos resíduos utilizados na presente pesquisa, pelo método de peneiras, com amostras de 100 gramas para os resíduos de casca de eucalipto e lodo da estação de tratamento de efluentes, lama de carbonato de cálcio e lodo do beneficiamento de rochas ornamentais.

Tabela 6 – Análise granulométrica dos resíduos utilizados nessa pesquisa (gramas em base seca)

Diâmetro da peneira	Casca de Eucalipto	Lodo da ETE	Lama de Cal	LBRO
4,8 mm	0,97	1,72	-	-
2,0 mm	19,49	17,61	0,67	0,53
1,0 mm	16,10	16,71	-	-
0,84 mm	11,19	14,21	5,00	10,81
0,30 mm	27,11	21,77	9,91	19,00
Fundo	24,83	27,83	84,09	74,14

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 6, assim como nas especificações sobre fertilizantes dispostos na IN n° 61/2020, a granulometria dos resíduos Fertilizante Comercial, Casca de Eucalipto e Lodo da ETE se enquadram como farelados e a Lama de Cal e a LBRO se enquadram como pó.

A amostra com Casca de Eucalipto apresentou valor de pH de 8,31, indicando um ambiente levemente alcalino. A condutividade elétrica (CE) foi medida em 1640 μ S, o que sugere uma concentração moderada de sais dissolvidos (DA SILVA, 2009). Esse nível de condutividade elétrica pode influenciar a aplicação em solos, dependendo da tolerância das plantas à salinidade (AYERS; WESTCOT, 1999).

A amostra de lodo da ETE apresentou um pH de 8,17, também em uma faixa levemente alcalina. A condutividade elétrica foi significativamente baixa, com valor de 4,77 μS . Kominko (2017) e Tejada (2005) destacam a importância de baixa condutividade elétrica em fertilizantes organominerais, pois indica menor quantidade de sais solúveis e menor risco de salinização.

A lama de cal apresentou um pH de 10,68, o que a caracteriza como um resíduo altamente alcalino, adequado para a correção de solos ácidos (TEIXEIRA, 2003). A condutividade elétrica foi de 1068 μS . O pH da amostra de LBRO foi de 9,15. A condutividade elétrica foi relativamente baixa, com valor de 333 μS . A amostra do composto comercial da Vida-E apresentou pH de 8,24, na faixa alcalina, e condutividade elétrica foi de 1365 μS .

Esses resultados sugerem que, dependendo do solo e das condições de cultivo, cada resíduo tem um papel específico, sendo alguns mais adequados para correção de acidez e outros para contribuir com a fertilidade sem aumentar a salinidade.

Para o resíduo da Casca de Eucalipto, a média do teor de umidade das amostras foram de 54,16% (DP 0,78) e para o resíduo do Lodo de ETE, a média do teor de umidade das amostras foram de 53,04% (DP 1,67), Esses indicadores de umidade podem favorecer o processo de decomposição e indicam o potencial de fornecer matéria orgânica, como explica Sausen (2021), o lodo de ETE ao chegar na central de tratamento dos resíduos possui uma relação C:N de 15:1.

Para a Lama de Cal foi encontrado um teor de umidade de 87,78% e para a LBRO 73,10%, como a utilização das lamas é na sua forma seca, isso indica que será um material concentrado e de fácil incorporação no solo. Esses dados são fundamentais para avaliar o comportamento de cada material quando utilizado como fertilizante ou condicionador de solo, influenciando diretamente na sua capacidade de retenção de água, decomposição e liberação de nutrientes.

A Tabela 7 apresenta a caracterização química dos resíduos utilizados na presente pesquisa, pelo método de análise de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 7 – Análise qualitativa FRX

Resíduo	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos Traços (< 5%)
Casca de Eucalipto	-	Ca, Si, Fe, Al	K, Ti, Mn, P, S, Sr, Zr, Zn, Rb, Cu
Lodo da ETE	-	Si, Al, Ca, Fe	S, K, Ti, P, Ba, Mn, Zn, Sr, Cu, Rb
Lama de cal	Ca	-	P, Sr, K, Si, S
LBRO	-	Si, Ca, Fe, Al	K, Mg, Ti, P, Sr, Zr, Mn, S, Rb, Zn

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos resultados obtidos por fluorescência de raios-X apresentados na Tabela 7, indica a potencialidade de uso dos resíduos sólidos industriais nas formulações de fertilizante organominerais, considerando sua composição química e os impactos potenciais que os elementos majoritários, em menor quantidade e traços podem ter na qualidade final do produto (DE TOLEDO et al., 2015; KOMINKO et al., 2017).

A análise química qualitativa por FRX mostrou que o resíduo da casca de eucalipto tem sua composição química apresentando elementos em menores quantidades (5% < x < 50%) como cálcio (Ca), silício (Si), ferro (Fe) e alumínio (Al), e elementos traços como potássio (K), titânio (Ti), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), estrôncio (Sr), zircônio (Zr), zinco (Zn), rubídio (Rb) e cobre (Cu).

O resíduo do lodo da ETE apresentou em sua composição elementos em menores quantidades (5% < x < 50%) como silício (Si), alumínio (Al), cálcio (Ca) e ferro (Fe). Além disso, elementos traços como enxofre (S), potássio (K), titânio (Ti), fósforo (P), bário (Ba), manganês (Mn), zinco (Zn), estrôncio (Sr), cobre (Cu) e rubídio (Rb) também foram detectados em quantidades inferiores a 5%.

O resíduo lama de cal utilizado tem em sua composição química um alto teor de Ca (>50%), seguido de elementos traços (<5%) como fósforo (P), estrôncio (Sr), potássio (K), silício (Si) e enxofre (S).

No caso do resíduo LBRO, a análise identificou silício (Si), cálcio (Ca), ferro (Fe) e alumínio (Al) como elementos presentes em menores quantidades (5% < x <

50%) e com traços de potássio (K), magnésio (Mg), titânio (Ti), fósforo (P), estrôncio (Sr), zircônio (Zr), manganês (Mn), enxofre (S), rubídio (Rb) e zinco (Zn).

A utilização dos elementos presentes nas amostras analisadas pode trazer benefícios significativos para a agricultura, especialmente no cultivo da rúcula (*Eruca sativa*), variedade Rokita. Dentre os principais elementos encontrados nas amostras, o fósforo, potássio, cálcio, silício e o ferro possuem potenciais benefícios para a utilização na agricultura.

Portanto, o uso dos resíduos analisados como fertilizantes na agricultura, em especial no cultivo da rúcula Rokita, pode fornecer nutrientes essenciais e benéficos para o crescimento e desenvolvimento da planta. A presença desses elementos em um fertilizante organomineral pode contribuir para a melhoria da qualidade das folhas, aumento da produtividade e resistência a condições adversas, tornando-os opções viáveis para a agricultura sustentável.

4.2 Caracterização dos fertilizantes organominerais

A Tabela 8 apresenta a análise granulométrica das formulações do fertilizante organomineral produzido e do fertilizante organomineral comercial da empresa Vida-E, pelo método de peneiras, com amostras de 100 gramas para cada resíduo.

Tabela 8 – Análise granulométrica dos tratamentos (gramas)

Diâmetro da peneira	TC	T0	T1	T2	T3
2,00 mm	21,13	19,08	20,87	13,91	14,68
0,84 mm	27,35	25,58	28,35	24,37	22,53
0,60 mm	18,54	7,59	6,50	6,04	7,08
0,30 mm	4,00	22,85	21,72	23,39	22,20
Fundo	28,99	24,46	22,02	31,66	33,03

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme os resultados apresentados, e de acordo com as especificações sobre fertilizantes dispostos na IN n° 61/2020, a granulometria dos fertilizantes organominerais produzidos e o fertilizante organomineral comercial se enquadram como um pó.

A Tabela 9, apresenta os resultados da análise química para cada tratamento. Os parâmetros avaliados incluem o pH, concentração de fósforo (P), potássio (K), matéria orgânica (MO), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), entre outros resultados. A partir desses resultados, pode-se observar diferenças significativas entre os tratamentos experimentais (T1, T2, T3), o tratamento controle (T0) e o fertilizante organomineral comercial (TC).

Tabela 9 – Análise química dos fertilizantes organominerais

Parâmetro	Fertilizante		Fertilizante		
	Organomineral	Organomineral	Organomineral		
	Comercial	Produzido	T0	T1	T2
	TC	T0	T1	T2	T3
Argila %	10,0	9,3	9,0	9,7	9,3
pH (H ₂ O)	8,1	7,8	7,9	7,9	8,0
Índice SMP	7,5	7,4	7,4	7,4	7,4
P (mg/dm ³)	7,8	15,3	4,4	2,4	3,7
K (mg/dm ³)	>400	>400	>400	>400	>400
M.O. %	>10	>10	>10	>10	>10
Al (cmol _c /dm ³)	0	0	0	0	0
Ca (cmol _c /dm ³)	25,2	25,3	28,7	27,8	32,5
Mg (cmol _c /dm ³)	4,6	5,4	5,8	5,3	6,0
H+Al (cmol _c /dm ³)	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
CTC (cmol _c /dm ³)	33,0	33,9	37,8	36,2	41,7
%SAT CTC	98	97	98	98	98
Ca/Mg	5,4	4,7	5,0	5,2	5,4
Ca/K	10,0	11,0	12,0	12,3	14,3
Mg/K	1,9	2,3	2,4	2,4	2,7
S (mg/dm ³)	683,3	431,3	438,3	411,0	339,7
Zn (mg/dm ³)	12,3	13,3	4,1	0,3	0,1
Cu (mg/dm ³)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
B (mg/dm ³)	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5
Mn (mg/dm ³)	9,7	25,7	26,7	23,7	25,3

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores de pH variaram entre 7,8 e 8,1, mantendo-se ligeiramente alcalinos para todos os tratamentos, conforme observado por Audu (2015), que demonstrou aumento de pH do solo após a aplicação de fertilizante organomineral, atingindo 7,50 em sua maior dose de 250 kg/ha.

Observa-se que o teor de fósforo foi superior no tratamento controle (T0) em comparação com as formulações experimentais. O tratamento T0 apresentou uma média de 15,3 mg/dm³ de P, enquanto as formulações experimentais (T1, T2 e T3) apresentaram valores significativamente mais baixos, variando entre 2 e 5 mg/dm³. Isso é consistente com Kominko et al. (2017), que mencionam a liberação gradual de fósforo em fertilizantes organominerais, o que pode resultar em menores teores iniciais desse nutriente. A adição progressiva de lama de cal e lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) nas formulações experimentais parece ter impactado diretamente a disponibilidade de fósforo na planta. Esses resultados sugerem que a composição das formulações pode influenciar significativamente a dinâmica desse nutriente, sendo essencial para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes no uso desses materiais como fertilizantes.

Os teores de potássio mantiveram-se elevados, acima de 400 mg/dm³, em todas as amostras analisadas, evidenciando uma alta disponibilidade desse nutriente. Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, o que é consistente com o que foi observado por Audu (2015), que também verificou que o potássio permaneceu elevado em todos os tratamentos após a aplicação do fertilizante organomineral. Esses resultados indicam uma homogeneidade na distribuição desse nutriente entre os diferentes tratamentos aplicados.

Os valores de cálcio e magnésio aumentaram progressivamente nas formulações experimentais T1, T2 e T3, com destaque para o tratamento T3, que apresentou os maiores teores de Ca (32,5 cmol/dm³) e Mg (6,0 cmol/dm³). Esse aumento pode ser atribuído à adição de maior quantidade de lama de cal e lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO), ambos ricos em cálcio e magnésio, o que é suportado pelos achados de Kominko et al. (2017), que relatam o aumento da disponibilidade de Ca e Mg no solo após a aplicação de fertilizantes organominerais. Esses resultados demonstram o potencial desses materiais para enriquecer o teor de Ca e Mg, favorecendo a nutrição vegetal em sistemas agrícolas.

A capacidade de troca catiônica (CTC) variou entre 33,0 e 41,7 cmol/dm³, sendo esses valores mais elevados nos tratamentos T1, T2 e T3, com destaque para

o tratamento T3, que apresentou o maior valor de CTC ($41,7 \text{ cmol/dm}^3$), em conformidade com os resultados de Kominko et al. (2017), que relataram um aumento na CTC após o uso de fertilizantes organominerais à base de lodo de esgoto. A saturação da CTC foi de 98% em todos os tratamentos, o que indica que a maior parte das cargas negativas do solo está saturada com cátions básicos, como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K). Esse resultado sugere uma alta capacidade do fertilizante organomineral produzido em reter nutrientes essenciais, favorecendo a fertilidade e o potencial produtivo das culturas, particularmente nos tratamentos com adição de lama de cal e LBRO.

A relação Ca/Mg, que reflete o equilíbrio entre esses dois nutrientes essenciais, foi mantida dentro de faixas adequadas em todos os tratamentos, com valores variando de 4,7 a 5,4, dados que estão em linha com os de Audu (2015), que verificou uma proporção equilibrada entre cálcio e magnésio após a aplicação do fertilizante organomineral. Esse equilíbrio é fundamental para o crescimento vegetal, pois garante uma absorção harmoniosa desses nutrientes, evitando competições excessivas entre eles nas raízes das plantas.

A relação Ca/K, que é um importante indicador da competitividade entre cálcio e potássio na absorção pelas plantas, apresentou valores mais altos no tratamento T3 (14,3), sugerindo uma maior disponibilidade de cálcio em relação ao potássio. Essa maior relação pode favorecer a absorção de cálcio pelas plantas, embora seja necessário monitorar o equilíbrio com o potássio para evitar possíveis deficiências deste último.

No que diz respeito aos micronutrientes, o tratamento controle (T0) apresentou concentrações mais altas de zinco (Zn), enquanto as formulações experimentais, especialmente T2 e T3, apresentaram valores significativamente menores, corroborando com o que foi observado por Audu (2015), onde as doses mais altas de fertilizante organomineral resultaram em menor teor de zinco no solo. Essa diminuição nos níveis de zinco pode representar uma limitação em sistemas onde esse micronutriente é essencial para o crescimento vegetal, podendo comprometer a produção agrícola. O zinco desempenha papéis críticos no metabolismo enzimático e na síntese de proteínas, e sua disponibilidade inadequada pode levar a deficiências nutricionais nas plantas. Assim, os resultados reforçam a necessidade de ajustes nas formulações de fertilizantes organominerais para garantir a manutenção de teores

adequados de micronutrientes, particularmente em contextos em que o zinco é um fator limitante.

Em relação ao manganês (Mn), o tratamento T0 exibiu as maiores concentrações, mas os tratamentos T1, T2 e T3 mantiveram níveis adequados de Mn, próximos a 25 mg/dm³, o que é considerado suficiente para o desenvolvimento saudável das plantas. Já as concentrações de cobre (Cu) e boro (B) permaneceram relativamente constantes entre todos os tratamentos, o que indica que a adição de resíduos como lama de cal e lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) não impactou negativamente esses nutrientes.

Os resultados obtidos indicam que as formulações experimentais, especialmente o tratamento T3, contribuíram para o aumento da disponibilidade de alguns nutrientes essenciais, como cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Esse comportamento é semelhante ao observado por Kominko et al. (2017), que relataram um aumento significativo de cálcio e magnésio em solos tratados com fertilizantes organominerais à base de lodo de esgoto, com teores de Ca alcançando 7,1 cmol/kg e Mg atingindo 2,8 cmol/kg. Essas melhorias refletem a eficácia da adição de resíduos, como lama de cal e lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO), na elevação da qualidade nutricional do ambiente de cultivo. Por outro lado, o teor de fósforo nas formulações que incluíram lama de cal e LBRO foi significativamente reduzido, o que pode comprometer o desenvolvimento das plantas, já que o fósforo é essencial para o crescimento vegetal. Conforme observado por Ayeni (2012), a inclusão de uma pequena quantidade de fertilizante mineral NPK pode promover a mineralização precoce de fósforo, resultando em teores mais elevados de P no solo, chegando a 10 mg/kg.

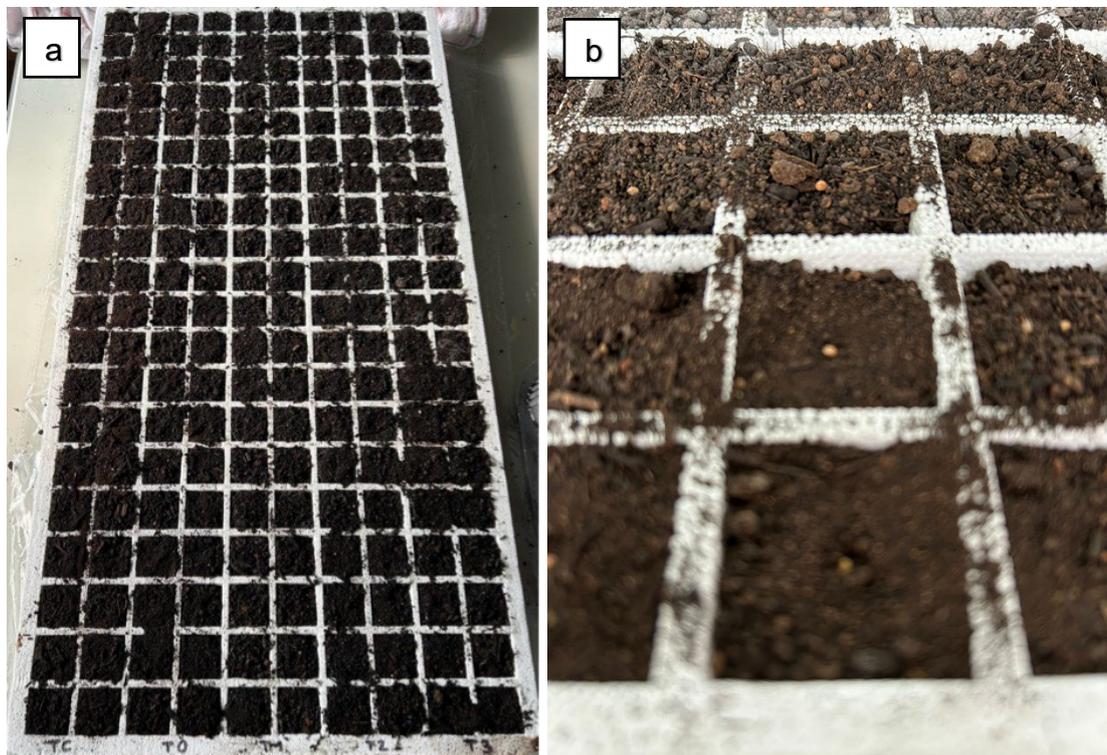
Desta forma, ajustes na composição dos fertilizantes organominerais testados, como a inclusão de NPK, podem ser uma solução viável para equilibrar a disponibilidade de fósforo e otimizar o desempenho agrícola, garantindo um desenvolvimento mais robusto das plantas.

4.3 Produção Vegetal

O experimento foi instalado na bandeja de 200 células, com 10 gramas do fertilizante organomineral, a cada duas linhas verticais continha um tratamento

diferente. A semeadura ocorreu com uma semente de Rúcula Rokita por célula, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Instalação do experimento (a), semeadura (b)



Fonte: Registrada pela autora.

A primeira germinação ocorreu dois dias após a semeadura, nas células do tratamento 3 (T3), após o terceiro dia ocorreu a germinação nos demais tratamentos. Ao final do experimento, após 15 dias, os cotilédones germinados estavam com duas folhas, podendo ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Cotilédones ao final do experimento



Fonte: Registrada pela autora.

Tabela 10 – Taxa de germinação (%)

Tratamento	Taxa de germinação (%)
TC	40
T0	68
T1	65
T2	70
T3	65

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme apresentado na Tabela 10, o tratamento T0 teve uma taxa de germinação de 68%, enquanto os tratamentos T1 e T3 apresentaram taxas semelhantes, ambas de 65%. O tratamento T2 destacou-se com a maior taxa de germinação, atingindo 70%. Esses resultados indicam que, embora o fertilizante organomineral tenha proporcionado uma taxa de germinação superior ao tratamento comercial (TC), as variações entre os diferentes tratamentos organominerais produzidos foram mínimas.

Figura 8 – Imagens das medições de cada tratamento





Fonte: Registrada pela autora.

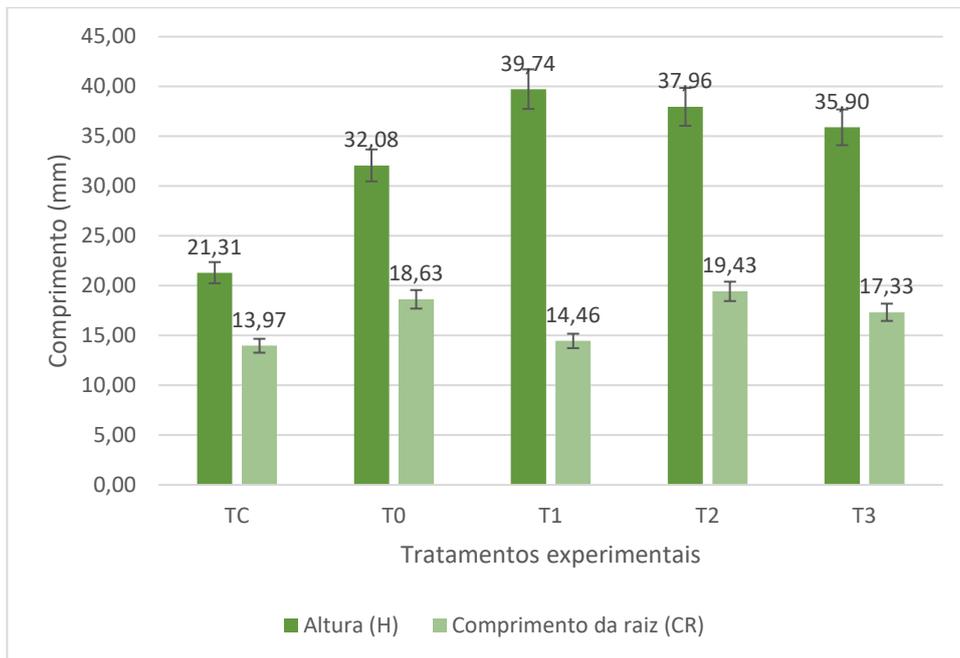
As medições foram realizadas para cada tratamento com base nas variáveis de altura da plântula (H), diâmetro do coleto (DC) e comprimento da raiz (CR), conforme ilustrado na Tabela 11. Gráficamente, os resultados para altura e comprimento da raiz são apresentados na Figura 9.

Tabela 11 – Resultados dos parâmetros de crescimento das plântulas de rúcula para cada tratamento (mm)

TRATAMENTO	H		DC		CR	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
TC	21,31	2,15	0,88	0,12	13,97	2,89
T0	32,08	2,91	0,92	0,13	18,63	0,73
T1	39,74	3,70	1,10	0,14	14,46	2,88
T2	37,96	4,29	0,99	0,13	19,43	3,14
T3	35,90	2,99	0,84	0,07	17,33	1,37

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – Resultados gráficos dos parâmetros de crescimento para cada tratamento (mm)



Fonte: Elaborado pela autora.

Foi observado que, à medida em que houve a adição dos resíduos sólidos industriais, casca de eucalipto, lodo da ETE, lama de cal e LBRO, houve uma variação no desempenho das plântulas de rúcula. O tratamento T1 apresentou os melhores resultados em altura e diâmetro do coleto, enquanto o tratamento comercial (TC) teve o pior desempenho em todos os parâmetros de crescimento avaliados (altura, diâmetro do coleto e comprimento da raiz). Essa diferença pode ser explicada pela modificação nas propriedades físico-químicas do substrato, que, com a adição de resíduos, pode ter influenciado positivamente a disponibilidade de nutrientes e a estrutura do solo, conforme discutido por Kominko et al. (2017).

No entanto, a incorporação de resíduos também pode acarretar efeitos adversos. O aumento do pH, decorrente da utilização de resíduos como a lama de cal e a LBRO, pode ter restringido a absorção de nutrientes pelas plantas, como observado por Audu (2015) em seu estudo sobre fertilizantes organominerais. Além disso, a estrutura do fertilizante organomineral pode ter sido afetada pela compactação, o que pode ter limitado o desenvolvimento radicular. Esse comportamento foi verificado em outros estudos, como o de Tejada (2005), que destacou a importância da manutenção de uma estrutura adequada do solo para permitir o crescimento radicular e a absorção de nutrientes.

Devido ao comportamento dos fertilizantes organominerais, observa-se um aumento na disponibilidade de nutrientes nos tratamentos ao longo do período avaliado. A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar as diferenças significativas entre os tratamentos (T0, T1, T2 e T3) em relação aos parâmetros analisados, como as concentrações de nutrientes e outros aspectos químicos. Os resultados indicaram que o fator "Amostra" apresentou um valor de $F = 45,63$, com $p < 0,0001$, demonstrando diferenças significativas entre os tratamentos. Além disso, o fator "Colunas", que representa os diferentes parâmetros avaliados, mostrou-se altamente significativo ($F = 2377,63$, $p < 0,0001$), evidenciando que as variáveis analisadas apresentaram diferenças estatísticas marcantes. A interação entre tratamentos e variáveis também foi significativa ($F = 31,21$, $p < 0,0001$), sugerindo que os efeitos dos tratamentos variaram de acordo com os parâmetros avaliados.

Tabela 12 – ANOVA aplicado aos resultados do fertilizante organomineral produzido

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Amostra	1010,3546 1	4	252,58865 3	45,62833	3,377E-24	2,43874
Colunas	26324,138	2	13162,069	2377,6337	5,856E-106	3,0632
Interações	1382,0982	8	172,76228	31,208	3,157E-27	2,00763
Dentro	747,33097	135	5,535785			
Total	29463,922	149				

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, a proporção do fertilizante organomineral produzido deve ser levada em consideração ao utilizá-lo em cultivo com plantas. Toledo (2015) notou que a combinação equilibrada de compostos organominerais podem melhorar significativamente o crescimento da parte aérea e do sistema radicular das plantas, ao otimizar a disponibilidade de nutrientes e a estrutura física do substrato. O uso de resíduos, como os abordados por Ayeni (2012) e Kominko et al. (2017), mostrou que uma aplicação balanceada desses fertilizantes tende a melhorar a fertilidade do solo e promover uma liberação gradual de nutrientes, o que favorece o desenvolvimento das culturas agrícolas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam a potencial viabilidade técnica da produção de fertilizantes organominerais utilizando resíduos sólidos industriais, como resíduos da casca de eucalipto, lodo da estação de tratamento de efluentes, lama de carbonato de cálcio e lama do beneficiamento de rochas ornamentais, atendendo aos objetivos propostos.

As análises químicas das formulações experimentais demonstraram que o tratamento T3 promoveu uma melhoria significativa na disponibilidade de macronutrientes, como cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Além disso, observou-se que a capacidade de troca catiônica (CTC) foi elevada nas formulações experimentais, sugerindo uma maior capacidade de retenção de nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas.

Entretanto, observou-se uma redução nos teores de fósforo nas formulações que continham lama de cal e LBRO, destacando a necessidade de ajustes na composição dos fertilizantes organominerais, como a inclusão de fontes complementares de fósforo, para garantir um balanço nutricional adequado.

Os testes realizados com sementes de rúcula evidenciaram que o tratamento T1 promoveu os melhores resultados em altura e diâmetro das plântulas, enquanto o tratamento T2 obteve maior taxa de germinação (70%) e maior comprimento de raiz, sugerindo melhorias na adaptação e no potencial de absorção de nutrientes. Esses resultados refletem os benefícios físicos e químicos proporcionados pelos fertilizantes organominerais testados.

Os resultados deste estudo indicam que a utilização de resíduos sólidos industriais para a produção de fertilizantes organominerais é uma alternativa viável. A reciclagem desses resíduos não só contribui para a redução do impacto ambiental, mas também oferece uma alternativa promissora para a valorização de resíduos e para a mitigação da dependência de fertilizantes minerais convencionais.

6. TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e discussões apresentados, várias vias de pesquisa emergem como potenciais trabalhos futuros, contribuindo para a expansão do conhecimento na área e aprimoramento dos processos envolvidos. Algumas dessas vias incluem:

- **Otimização de formulações de fertilizantes organominerais:** Investigar ajustes na composição dos fertilizantes, principalmente em relação à adição de fontes de fósforo, para melhorar o balanço nutricional e aumentar a disponibilidade desse nutriente no solo.
- **Estudo sobre diferentes culturas:** Expandir os testes para incluir uma variedade de culturas agrícolas, além da rúcula Rokita, para verificar a eficácia dos fertilizantes em diferentes condições de cultivo e requisitos nutricionais.
- **Desenvolvimento de fertilizantes de liberação controlada:** Explorar o desenvolvimento de formulações de fertilizantes organominerais com mecanismos de liberação controlada de nutrientes, maximizando sua eficiência e minimizando as perdas por lixiviação.
- **Escalabilidade industrial e viabilidade econômica:** Investigar a viabilidade técnica e econômica de escalar a produção dos fertilizantes organominerais em indústrias, considerando os custos de produção, logística e os potenciais benefícios econômicos e ambientais em larga escala.

Essas linhas de pesquisa não apenas ampliam o conhecimento gerado nesta dissertação de mestrado, como também promovem inovações sustentáveis na indústria da celulose e das rochas ornamentais, ao incentivar o uso de resíduos como matérias-primas e reduzir os impactos ambientais, beneficiando a agricultura e o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ALYAMAÇ, K.E.; TUĞRUL, E. A durable, eco-friendly and aesthetic concrete work: marble concrete. **Proceedings of the 11th International Congress on Advances in Civil Engineering**, Turquia, 2014.
- AMARAL, R. L.; SIQUEIRA, E. Gestão de resíduos sólidos na indústria de celulose e papel. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 25-33, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Balanço do Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais e de Revestimentos em 2023. Disponível em: < <https://abirochas.com.br/biblioteca/informes-abirochas/> > 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15012**: Rochas para revestimento de edificações - Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- AUDU, M. et al. Influence of organomineral fertilizer on some chemical properties of soil and growth performance of rice (*Oryza sativa* L.) in Sokoto, Sudan Savanna Zone of Nigeria. **Journal of Natural Sciences Research**, v. 5, n. 14, p. 64-68, 2015.
- AYENI, L. S.; ADELEYE, E. O.; ADEJUMO, J. O. Comparative effect of organic, organomineral and mineral fertilizers on soil properties, nutrient uptake, growth and yield of maize (*Zea mays*). 2012.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba. **FAO Irrig. Drain. Pap**, n. 29, p. 1-218, 1999.
- AZEVEDO, A.F.G.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G.C.; PEDROTI, L. Recycling paper industry effluent sludge for use in mortars: A sustainability perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 335 – 346, 2018.

- BAJPAI, Pratima. **Green chemistry and sustainability in pulp and paper industry**. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- BELLO, W. B. et al. Comparative evaluation of different levels and types of Organo-mineral fertilizers on growth and performance of nursery Palm (*Elaeis guineensis* jacq). **Federal University of Agriculture**, p. 175-182, 2014.
- BRASIL, 2020. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Defesa Agropecuária. INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 61, DE 8 DE JULHO DE 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>>. Acesso em: 23 Mar 2024.
- CAMPOS, A. B.; MARTINS, J. P.; COSTA, L. F. Utilização de cinzas de caldeira como corretivo de acidez de solo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 145-158, 2020.
- CARVALHO, Kaio Henrique Adame de; SILVA, Márcio Lopes da; SOARES, Naisy Silva. Efeito da área e da produtividade na produção de celulose no Brasil. **Revista Árvore**, v. 36, p. 1119-1128, 2012.
- COSME, R. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; CALMON, J. L. Use of frequency sweep and MSCR tests to characterize asphalt mastics containing ornamental stone residues and LD steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 556 – 566, 2016.
- DA SILVA, F. C. et al. Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. 2009.
- DE TOLEDO, Fábio HSF et al. Composto de resíduos da fabricação de papel e celulose na produção de mudas de eucalipto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 711-716, 2015.
- DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. Fertilizantes: uma visão global sintética. BNDES Setorial, n. 24, p. 97-138, set. 2006.
- EPA, U. SW-846 test method 9045D: soil and waste pH. **US EPA, Washington DC**, 2004.
- FAQUIN, Valdemar. Nutrição mineral de plantas. **Lavras: UFLA/Faepe**, v. 183, 2005.

FAVARO, S. P.; PANDOLFO, L.; LIMA, M. L. Reaproveitamento de lodos biológicos como condicionadores de solo. **Ciência e Tecnologia do Solo**, v. 32, n. 4, p. 354-362, 2019.

FERNANDES, André LT; TESTEZLAF, Roberto. Fertirrigação na cultura do melão em ambiente protegido, utilizando-se fertilizantes organominerais e químicos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 45-50, 2002.

FRASCÁ, Maria Heloísa Barros de Oliveira. Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas, 2014.

FOELKEL, Celso EB. O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor Kraft de cozimento. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. ABTCP, 2009.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilization of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 769 – 781, 2016.

GUERRA, G. R. Resíduos sólidos na indústria de papel e celulose: geração e alternativas de manejo. **Revista de Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 3, p. 15-22, 2007.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual IBÁ 2023. **Disponível em: <https://iba.org/publicacoes>**. Acesso em março de 2024. IBÁ, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Comissão Nacional de Classificação (CONCLA). IBGE, 2023. Disponível em: <<https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html?view=classe&tipo=cnae&versao=10&classe=17109&chave=celulose>> Acesso em: 12 abr. 2023.

KARACA, Z.; PEKIN, A.; DELIORMANLI, A.H. Classification of dimension stone wastes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, p. 2354–2362, 2012.

KINNARINEN, Teemu et al. Separation, treatment and utilization of inorganic residues of chemical pulp mills. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 953-964, 2016.

KOBETIČOVÁ, K.; ČERNÝ, R. Ecotoxicology of building materials: A critical review of recent studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 500 – 508, 2017.

KOMINKO, Halyna; GORAZDA, Katarzyna; WZOREK, Zbigniew. The possibility of organo-mineral fertilizer production from sewage sludge. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, p. 1781-1791, 2017.

KOPITTKE, P. M. et al. Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral

nutrition and environmental outcomes. *Environmental Science: Nano*, v. 6, n. 12, p. 3513–3524, 2019.

LIKON, M.; TREBSE, P. Impact of paper mill sludge on environment: improvement of soil properties and reduction of waste material. *Waste Management*, v. 32, n. 12, p. 2744-2751, 2012.

MALAISKIENE, J.; SOUZA, M. P.; OLIVEIRA, A. G. Análise de resíduos sólidos de estações de tratamento de efluentes de fábricas de celulose. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 1, p. 99-105, 2018.

MALAISKIENE, Jurgita et al. The impact of primary sludge from paper industry on the properties of hardened cement paste and mortar. *Construction and Building Materials*, v. 172, p. 553-561, 2018.

MASHALY, A. O.; EL-KALIOUBY, B. A.; SHALABY, B. N.; EL-GOHARY, A. M.; RASHWAN, M. A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 731 – 741, 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). Instrução Normativa SDA N.º 17. *Diário Oficial da União*- Seção 1, n.º 99, 24 de maio de 2007. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos para Plantas e Condicionadores de Solo. Brasília, 2007.

MITTRI, S. H. M.; DEGEN, M. K.; VIEIRA, G. L.; VAZZOLER, J. S.; RODRIGUES, L. H. C. H. Assessment of the pozzolanic activity of ornamental stone waste after heat treatment and its effect on the mechanical properties of concretes. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 6, p. 1186 –1207, 2018.

MODOLO, R. C. E. et al. Lime mud from cellulose industry as raw material in cement mortars. *Materiales de Construcción*, v. 64, n. 316, p. e033-e033, 2014.

NKURUNZIZA, Libère et al. Socio-ecological factors determine crop performance in agricultural systems. *Scientific reports*, v. 10, n. 1, p. 4232, 2020.

NORGATE, Terry E.; JAHANSHAH, Sharf; RANKIN, William J. Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of cleaner production*, v. 15, n. 8-9, p. 838-848, 2007.

OLIVÉRIO, José Luiz et al. Integrated production of organomineral biofertiliser (BIOFOM®) using by-products from the sugar and ethanol agro-industry, associated with the cogeneration of energy. *Sugar tech*, v. 13, p. 17-22, 2011.

PARENT, Leon E.; KHIARI, Lotfi; PELLERIN, Annie. The P fertilization of potato: Increasing agronomic efficiency and decreasing environmental risk. In: XXVI International Horticultural Congress: Toward Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production 627. 2002. p. 35-41.

PERVAIZ, Muhammad; SAIN, Mohini. Recycling of paper mill biosolids: a review on current practices and emerging biorefinery initiatives. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 43, n. 6, p. 919-926, 2015.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater— a review. **Science of the total environment**, v. 333, n. 1-3, p. 37-58, 2004.

RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H. K.; MOHNOT, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 312 – 331, 2016.

RIBEIRO, Edielza Aline dos Santos et al. Sistemas produtivos, disponibilidade de biomassa e atributos energéticos de caroço de açaí e resíduos de serrarias familiares, em várzea estuarina do Rio Amazonas. 2017.

RODRIGUES, L. R. et al. Caracterização de resíduos sólidos da indústria de celulose tipo kraft visando sua aplicação no desenvolvimento de materiais cerâmicos. **Natal, RN, Brasil**, 2016.

ROSA, J. P.; LIMA, E. F.; COLODETTE, J. L. Lignin-based biofertilizers: new prospects for soil improvement. **Journal of Agricultural and Environmental Research**, v. 12, n. 2, p. 112-125, 2021.

SACRAMENTO, Raquel Santos et al. Utilização de composto orgânico proveniente da indústria de celulose na cultura do crambe. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 1, 2020.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19 – 32, 2016.

SAUSEN, Alexssander Henrique. O gerenciamento de resíduos sólidos provenientes da indústria de celulose CMPC Celulose Riograndense, com enfoque na compostagem da casca de eucalipto. 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TEDESCO J. M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5)

TEIXEIRA, João Ribeiro. Utilização de resíduos alcalinos de indústrias de celulose na correção da acidez do solo. 2003.

TEJADA, M.; BENITEZ, C.; GONZALEZ, J. L. Effects of application of two organomineral fertilizers on nutrient leaching losses and wheat crop. **Agronomy journal**, v. 97, n. 3, p. 960-967, 2005.

TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA, R. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 764 – 772, 2017.

ULIANA, J. G.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; NUNES, E. Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 2, p. 100 – 123, 2015.

UNITED NATIONS. World Population Prospects 2019: Methodology of the United Nations population estimates and projections. **Department of Economic and Social Affairs, Population Division**, p. 61, 2019.

VENTUROTI, G. P.; BOLDRINI-FRANÇA, J.; KIFFER, W. P.; FRANCISCO, A. P.; GOMES, A. S.; GOMES, L. C. Toxic effects of ornamental stone processing waste effluents on *Geophagus brasiliensis* (Teleostei: Cichlidae). **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 72, p. 103268, 2019.

VIDAL, F. W.; PINHEIRO, J. R.; CASTRO, N. F.; CARANASSIOS, A. **Tecnologia de Rochas Ornamentais**. In: Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento, CETEM/MCTI, p. 153 – 257, Rio de Janeiro, 2014.