



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**REUSO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO SATURADO COM NUTRIENTES COMO
CORRETIVO E FERTILIZANTE EM SOLOS AGRÍCOLAS E SEU IMPACTO NO
DESEMPENHO AGRONÔMICO DO FEIJÃO**

LISA ELIANA SAMUDIO LEGAL

Foz do Iguaçu-PR

2024



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**REUSO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO SATURADO COM NUTRIENTES
COMO CORRETIVO E FERTILIZANTE EM SOLOS AGRÍCOLAS E SEU
IMPACTO NO DESEMPENHO AGRONÔMICO DO FEIJÃO**

LISA ELIANA SAMUDIO LEGAL

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof^a. Dra. Andréia Cristina Furtado.

Co-orientador: Prof. Dr. Jiam Pires Frigo.

Foz do Iguaçu-PR

2024

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

L497

Legal, Lisa Eliana Samudio.

Reuso do calcário dolomítico saturado com nutrientes como corretivo e fertilizante em solos agrícolas e seu impacto no desempenho agrônomo do feijão / Lisa Eliana Samudio Legal. - Foz do Iguaçu, 2024.

139 f.: il., color.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu - PR, 2024.

Orientadora: Profa. Dra. Andréia Cristina Furtado.

Coorientador: Prof. Dr. Jiam Pires Frigo.

I. Efluente hidropônico. 2. Calcário dolomítico. 3. Corretivo da acidez do solo. I. Furtado, Andréia Cristina.
II. Frigo, Jiam Pires. III. Título.

CDU 628.4.038

**REUSO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO SATURADO COM NUTRIENTES
COMO CORRETIVO E FERTILIZANTE EM SOLOS AGRÍCOLAS E SEU
IMPACTO NO DESEMPENHO AGRONÔMICO DO FEIJÃO**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA



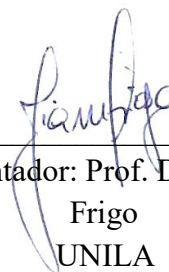
Orientadora: Prof^ª. Dra. Andréia
Cristina Furtado
UNILA

Documento assinado digitalmente
gov.br HENRIQUE CESAR ALMEIDA
Data: 20/05/2024 09:11:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Henrique Cesar Almeida
UNILA

Documento assinado digitalmente
gov.br LEONARDO DA SILVA ARRIECHE
Data: 20/05/2024 21:02:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

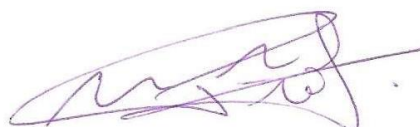
Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
UNILA



Co-orientador: Prof. Dr. Jiam Pires
Frigo
UNILA

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATA BRAGA SOARES
Data: 20/05/2024 10:07:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dra. Renata Braga Soares
UFMG



Prof^ª. Dra. Maria Natalia Piol
UBA



Prof^ª. Dra. Andrea Beatriz Saralegui
UBA

Foz do Iguaçu, 03 de abril de 2024.

**Dedico este trabalho à minha família,
em especial a minha filha Sara Maria.**

AGRADECIMENTOS

A Prof^a. Dra. Andreia Cristina Furtado pela orientação e paciência.

Ao Prof. Dr. Jiam Pires Frigo pelo apoio e orientação.

Ao Prof. M.Sc. Eng. Agr. Siméon Aguayo Trinidad pela colaboração e orientação.

A Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pela oportunidade para a realização do doutorado e pelas análises laboratoriais concedidas.

Ao Decano da Faculdade de Engenharia Agrônômica da Universidade Nacional do Leste, Prof. Eng. Agr. José Sánchez Martínez pelo apoio, e por disponibilizar toda a infraestrutura da faculdade para a realização da pesquisa. Também aos colegas de trabalho que colaboraram na realização dos ensaios.

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra estiveram envolvidas na realização do trabalho.

SAMUDIO LEGAL, Lisa Eliana. Reuso do calcário dolomítico saturado com nutrientes como corretivo e fertilizante em solos agrícolas e seu impacto no desempenho agrônômico do feijão. 2024. 139 f. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

As iniciativas de economia circular visam reduzir o uso de recursos, valorizar subprodutos e reaproveitar resíduos com pensamento não linear. Ao mesmo tempo, reduz as emissões de gases de efeito estufa e pode, portanto, ser utilizado para combater as mudanças climáticas. Por meio da abordagem da economia circular, pretende-se melhorar a fertilidade química do solo, valorizando os resíduos gerados durante o processo de adsorção, recuperando-os e reutilizando-os. Por esse motivo, no presente estudo avaliou-se o reuso do calcário dolomítico saturado com nutrientes adsorvidos do efluente hidropônico como corretivo e fertilizante em solos agrícolas e seu impacto no desempenho agrônômico do feijão. Para isso foi utilizado um delineamento experimental completamente casualizado, onde foram aplicados 4 tratamentos com 5 repetições, totalizando 20 unidades experimentais para cada tipo de solo. A caracterização do calcário dolomítico foi realizada antes e após a saturação com nutrientes do efluente. As propriedades dos solos arenosos e argilosos foram estudadas após correção com calcário dolomítico saturado, em comparação com calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico granulado durante o período de incubação de 30, 60 e 90 dias. Os parâmetros de desempenho agrônômico do feijão também foram avaliados para verificar a disponibilidade de nutrientes para a planta e, além disso, foi caracterizado o tecido vegetal para verificar a absorção de nutrientes no grão do feijão. Após a colheita da cultura, foram analisadas as propriedades químicas do solo, para avaliar o comportamento de suas propriedades ao final dos estudos. Os resultados dos ensaios de adsorção indicaram que o calcário dolomítico retém fósforo, manganês, cálcio e zinco. A composição elementar do calcário dolomítico é: C, O, Mg, Ca e Si. No calcário dolomítico in natura foi observado a presença majoritária de carbonatos de cálcio e magnésio; após o processo de adsorção, foi observado aumento de grupos carbonatos, devido à adsorção do cálcio do efluente hidropônico. O teor de cálcio aumentou de 37,84% (calcário dolomítico in natura) para 38,74% (calcário dolomítico saturado), enquanto o poder de neutralização acrescentou de 97,59% a 99,92%. O calcário dolomítico saturado possui boa afinidade com solos arenosos e argilosos, destacando sua qualidade de melhorar as propriedades químicas do solo, aumentando os níveis de pH, cálcio, magnésio e fósforo, além de reduzir completamente os teores de alumínio; fazendo com que a cultura tenha bom desenvolvimento, considerando os resultados obtidos para os parâmetros de desempenho agrônômico e os teores de nutrientes encontrados no feijão, principalmente de fósforo. Além disso, os níveis de pH, cálcio e fósforo nos solos continuaram a melhorar após a colheita do feijão. Tudo isso indica que o calcário dolomítico é um bom adsorvente de nutrientes e uma vez saturado, pode ser reutilizado para manter a fertilidade do solo, sendo uma alternativa promissora no cultivo do feijão.

Palavras-chave: efluente hidropônico; calcário dolomítico; corretivo; fertilizante; solos agrícolas.

SAMUDIO LEGAL, Lisa Eliana. Reutilización de calcáreo dolomítico saturado con nutrientes como correctivo y fertilizante en suelos agrícolas y su impacto en el desempeño agronómico del frijol. 2024. 139 h. Tesis (Doctorado en Energía y Sustentabilidad) - Universidad Federal de Integración Latinoamericana, Foz de Iguazú.

RESUMEN

Las iniciativas de economía circular están orientadas a disminuir el uso de recursos, valorizar subproductos y reutilizar residuos con un pensamiento no-lineal. Al mismo tiempo, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, puede utilizarse para combatir el cambio climático. Por medio del enfoque de economía circular se pretende mejorar la fertilidad química del suelo, valorizando los residuos generados durante el proceso de adsorción, recuperándolos y reutilizándolos. Por esta razón, en el presente estudio, se evaluó la reutilización de calcáreo dolomítico saturado con nutrientes adsorbidos del efluente hidropónico como correctivo y fertilizante en suelos agrícolas y su impacto en el desempeño agronómico del frijol. Para ello, se utilizó un diseño experimental completamente al azar, donde se aplicaron 4 tratamientos con 5 repeticiones, totalizando 20 unidades experimentales para cada tipo de suelo. La caracterización del calcáreo dolomítico se realizó antes y después de la saturación con nutrientes del efluente. Se estudió las propiedades de suelos arenosos y arcillosos luego de corregir con calcáreo dolomítico saturado, en comparación con calcáreo dolomítico in natura y calcáreo dolomítico granulado durante el periodo de incubación de 30, 60 y 90 días. También se evaluaron los parámetros del desempeño agronómico del frijol para verificar la disponibilidad de nutrientes para la planta y, además, se caracterizó el tejido vegetal para comprobar la absorción de nutrientes en el grano del frijol. Luego de la cosecha del cultivo, se analizaron las propiedades químicas del suelo, con el propósito de evaluar el comportamiento de sus propiedades al finalizar los estudios. Los resultados de los ensayos de adsorción indicaron que el calcáreo dolomítico retiene fósforo, manganeso, calcio y zinc. La composición elemental del calcáreo dolomítico es: C, O, Mg, Ca y Si. En el calcáreo dolomítico in natura se observó la presencia mayoritaria de carbonatos de calcio y magnesio; posterior al proceso de adsorción, se observó un aumento de los grupos carbonato, debido a la adsorción de calcio del efluente hidropónico. El contenido de calcio aumentó de 37,84% (calcáreo dolomítico in natura) a 38,74% (calcáreo dolomítico saturado), mientras que el poder neutralizante aumentó de 97,59% al 99,92%. El calcáreo dolomítico saturado tiene buena afinidad con los suelos arenosos y arcillosos, destacando su carácter para mejorar las propiedades químicas del suelo, aumentando los niveles de pH, calcio, magnesio y fósforo, además de reducir totalmente los tenores de aluminio; haciendo que el cultivo tenga buen desarrollo, considerando los resultados obtenidos para los parámetros de desempeño agronómico y las concentraciones de nutrientes encontradas en los granos del frijol, principalmente de fósforo. Además, los niveles de pH, calcio y fósforo en los suelos continuaron mejorando luego de la cosecha del frijol. Todo esto indica que el calcáreo dolomítico es un buen adsorbente de nutrientes y una vez saturada, el mismo puede ser reutilizado para mantener la fertilidad del suelo, siendo una alternativa promisoras para el cultivo del frijol.

Palabras clave: efluente hidropónico; calcáreo dolomítico; correctivo; fertilizante; suelos agrícolas.

SAMUDIO LEGAL, Lisa Eliana. Reuse of dolomitic calcareous saturated with nutrients as a corrective and fertilizer in agricultural soils and its impact on the agronomic performance of beans. 2024. 139 l. Thesis (Doctorate in Energy and Sustainability) - Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

Circular economy initiatives are aimed at reducing the use of resources, valuing byproducts and reusing waste with non-linear thinking. At the same time, it reduces greenhouse gas emissions and can therefore be used to combat climate change. Through the circular economy approach, the aim is to improve the chemical fertility of the soil, valuing the waste generated during the adsorption process, recovering and reusing it. For this reason, in the present study, the reuse of dolomitic calcareous saturated with nutrients adsorbed from hydroponic effluent as a corrective and fertilizer in agricultural soils and its impact on the agronomic performance of beans was evaluated. For this, a completely randomized experimental design was used, where 4 treatments with 5 repetitions were applied, totaling 20 experimental units for each type of soil. The characterization of the dolomitic calcareous was carried out before and after saturation with nutrients from the effluent. The properties of sandy and clayey soils were studied after correction with saturated dolomitic calcareous, in comparison with natural dolomitic calcareous and granulated dolomitic calcareous during the incubation period of 30, 60 and 90 days. The parameters of the agronomic performance of the bean were also evaluated to verify the availability of nutrients for the plant and, in addition, the plant tissue was characterized to verify the absorption of nutrients in the bean grain. After the crop was harvested, the chemical properties of the soil were analyzed, with the purpose of evaluating the behavior of its properties at the end of the studies. The results of the adsorption tests indicated that the dolomitic calcareous retains phosphorus, manganese, calcium and zinc. The elemental composition of dolomitic calcareous is: C, O, Mg, Ca and Si. In the natural dolomitic calcareous, the majority presence of calcium and magnesium carbonates was observed; after the adsorption process, an increase in carbonate groups was observed, due to the adsorption of calcium from the hydroponic effluent. The calcium content increased from 37.84% (natural dolomitic calcareous) to 38.74% (saturated dolomitic calcareous), while the neutralizing power increased from 97.59% to 99.92%. Saturated dolomitic calcareous has good affinity with sandy and clayey soils, highlighting its character to improve the chemical properties of the soil, increasing the levels of pH, calcium, magnesium and phosphorus, in addition to completely reducing aluminum content; making the crop have good development, considering the results obtained for the agronomic performance parameters and the concentrations of nutrients found in the bean grains, mainly phosphorus. Additionally, pH, calcium, and phosphorus levels in the soils continued to improve after the bean harvest. All this indicates that dolomitic calcareous is a good nutrient adsorbent and once saturated, it can be reused to maintain soil fertility, being a promising alternative for bean cultivation.

Keywords: hydroponic effluent; dolomitic calcareous; corrective; fertilizer; agricultural soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cadeia Produtiva dos Fertilizantes.....	29
Figura 2. Espectro FTIR do calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado.	50
Figura 3. Comparação entre os perfis de DRX antes e depois da adsorção de nutrientes..	51
Figura 4. Difratoograma de raios X do calcário dolomítico in natura (a) e calcário dolomítico saturado com nutrientes (b).	52
Figura 5. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura do calcário dolomítico antes (a) e depois (b) da adsorção de nutrientes.....	53
Figura 6. Mapeamento EDS e dispersão de elementos na amostra de calcário dolomítico in natura (a) e calcário dolomítico saturado com nutrientes (b).	54
Figura 7. Espectros EDS e quantificação de microanálise química das amostras de calcário dolomítico mostrado na Figura 6 (a) e (b), respectivamente.	55
Figura 8. Efeito da aplicação de corretivos sobre o pH de solo arenoso.....	58
Figura 9. Efeito da aplicação de corretivos no pH de solo argiloso.	60
Figura 10. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Alumínio do solo arenoso.	62
Figura 11. Efeito da aplicação de corretivos no Alumínio do solo argiloso.	63
Figura 12. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Cálcio do solo arenoso.	65
Figura 13. Efeito da aplicação de corretivos no Cálcio do solo argiloso.	66
Figura 14. Efeito da aplicação de corretivos no Magnésio do solo arenoso.	68
Figura 15. Efeito da aplicação de corretivos no Magnésio do solo argiloso.....	69
Figura 16. Efeito da aplicação de corretivos no Fósforo do solo arenoso.....	71
Figura 17. Efeito da aplicação de corretivos no Fósforo do solo argiloso.	72
Figura 18. Teor de Cálcio no grão de feijão.	76
Figura 19. Teor de Magnésio no grão de feijão.....	77
Figura 20. Teor de Potássio no grão feijão.	78
Figura 21. Teor de Fósforo no grão de feijão.	78
Figura 22. Teor de Nitrogênio no grão de feijão.	79
Figura 23. (a) pH do solo, (b) Alumínio (cmol/dm^3), (c) Cálcio (cmol/dm^3), (d) Magnésio (cmol/dm^3) e (e) Fósforo (mg/dm^3) nos tratamentos: T1 (controle), T2 (calcário dolomítico in natura), T3 (calcário dolomítico saturado) e T4 (calcário dolomítico granulado), após a colheita do feijão.	82
Desenho 1. Croqui contendo a disposição dos vasos com os diferentes tratamentos.....	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e suas implicações práticas.....	21
Quadro 2. Classificação da acidez do solo.	22
Quadro 3. Classificação dos corretivos quanto a concentração de CaO e MgO.	23
Quadro 4. Equivalentes químicos ou poder neutralizante de diferentes materiais puros usados como corretivo.	25
Quadro 5. Taxas de reatividade de partículas de diferentes tamanhos de calcários.	26
Quadro 6. Classificação dos calcários segundo PRNT.....	26
Quadro 7. Principais relações envolvendo adições de macronutrientes em excesso no solo que podem provocar a inibição de micronutrientes e fósforo.	28
Quadro 8. Principais relações dos efeitos de um íon sobre a absorção de outro.....	28
Quadro 9. Tratamentos aplicados.	44
Quadro 10. Doses de fertilizante aplicados para cada tipo de solo e em diferentes etapas.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentração de nutrientes determinados na amostra do efluente hidropônico..	48
Tabela 2. Concentração final e porcentagem de remoção de nutrientes.	48
Tabela 3. Qualidade de calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado.	56
Tabela 4. Resultados das análises físico-químicas realizadas nos dois tipos de solo.	57
Tabela 5. Efeito da aplicação de corretivos sobre o pH de solos arenosos e argilosos.....	58
Tabela 6. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Alumínio (Al) de solos arenosos e argilosos.....	61
Tabela 7. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Cálcio (Ca) de solos arenosos e argilosos.	64
Tabela 8. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Magnésio (Mg) de solos arenosos e argilosos.....	67
Tabela 9. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Fósforo (P) de solos arenosos e argilosos.	70
Tabela 10. Desempenho agrônômico do feijão.....	73

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1. Coletor de amostras de solo.....	101
Fotografia 2. Coleta de amostra de efluente hidropônico.	101
Fotografia 3. Filtração da amostra após passar pelo processo de adsorção.	102
Fotografia 4. Análise das amostras com o espectrofotômetro de absorção atômica.	102
Fotografia 5. Coleta de amostras de solo.	103
Fotografia 6. Condicionamento de amostras de solo antes da análise (trituração e peneiramento).	103
Fotografia 7. Pesagem de amostra de solo e corretivo e posterior mistura.	104
Fotografia 8. Controle de umidade do solo com aparelho portátil.	104
Fotografia 9. Extração de amostra de solo e transferência para o saco de polietileno com fecho ziplock.	105
Fotografia 10. Amostras transferidas para o laboratório.	105
Fotografia 11. Amostras preparadas para análise de fósforo.	106
Fotografia 12. Análise de alumínio.	106
Fotografia 13. Instalação de unidades experimentais para plantio.	107
Fotografia 14. Tratamento de sementes com fungicida.	108
Fotografia 15. Semeadura do feijão.	108
Fotografia 16. Germinação do feijão.	109
Fotografia 17. Aspecto das plantas.	109
Fotografia 18. Estágio de floração, brotação de vagens e secagem das vagens.	110
Fotografia 19. Colheita de vagens.	111
Fotografia 20. Amostragem de solo após a colheita de vagens.	111
Fotografia 21. Vagens coletadas.	112
Fotografia 22. Medição do comprimento de vagens.	112
Fotografia 23. Grãos separados para análise.	113
Fotografia 24. Trituração de grãos para análise foliar.	113

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	17
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. NUTRIENTES MINERAIS DO SOLO	19
2.2. CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS (CTC), SOMA DE BASES (SB) E SATURAÇÃO POR BASES (V%)	20
2.3. ACIDEZ DO SOLO.....	21
2.4. CLASSIFICAÇÃO DA ACIDEZ.....	22
2.5. CORREÇÃO DA ACIDEZ	22
2.6. CLASSIFICAÇÃO DE CORRETIVOS	23
2.6.1. Calcário.....	23
2.6.2. Cal Virgem Agrícola	23
2.6.3. Cal Hidratada Agrícola	23
2.6.4. Calcário Calcinado	24
2.6.5. Calcário “Filler”	24
2.6.6. Escórias de Siderurgia	24
2.6.7. Outros Materiais	24
2.7. CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE DOS CORRETIVOS.....	24
2.7.1. Poder de Neutralização.....	25
2.7.2. Tamanho das Partículas	25
2.7.3. Poder Relativo de Neutralização Total	26
2.8. RECOMENDAÇÃO DE CALAGEM	26
2.9. BENEFÍCIOS DA CALAGEM.....	27
2.10. EQUILÍBRIO NA ABSORÇÃO DE NUTRIENTES	27
2.11. FERTILIZANTES QUÍMICOS MINERAIS: PROCESSO PRODUTIVO E ASPECTOS AMBIENTAIS	29
2.12. HIDROPONIA	30
2.13. ECONOMIA CIRCULAR.....	31
2.14. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA CORREÇÃO E FERTILIZAÇÃO DE SOLOS	32
2.15. PROCESSOS DE ADSORÇÃO E USO DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO	35
2.16. CARACTERIZAÇÃO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO	37
2.16.1. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	37

2.16.2. Difração de Raios X (DRX)	38
2.16.3. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	38
3.OBJETIVOS.....	39
4.METODOLOGIA.....	40
4.1. TIPO DE ESTUDO	40
4.2. LOCAL DE ESTUDO	40
4.3. PROCEDIMENTOS.....	40
4.3.1. Saturação do Calcário Dolomítico.....	40
4.3.2. Caracterização do Calcário Dolomítico.....	41
4.3.3. Amostragem e Análise do Solo.....	42
4.3.4. Tratamento do Solo e Desempenho Agronômico do Feijão	43
4.3.5. Análise do Grão de Feijão	47
4.4. ANÁLISE DOS DADOS	47
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. SATURAÇÃO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO.....	48
5.2. CARACTERIZAÇÃO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO	49
5.2.1. Grupos funcionais por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	49
5.2.2. Identificação dos Componentes por Difração de Raios X (DRX).....	50
5.2.3. Informações Morfológicas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	52
5.2.4. Qualidade de Calcário Dolomítico In Natura e Calcário Dolomítico Saturado	56
5.3. ANÁLISE DO SOLO	56
5.4. TRATAMENTO DO SOLO	57
5.4.1. Efeito da Aplicação de Corretivo no pH de Solos Arenosos e Argilosos.....	57
5.4.2. Efeito da Aplicação de Corretivo no Alumínio (Al) de Solos Arenosos e Argilosos	61
5.4.3. Efeito da Aplicação de Corretivo no Cálcio (Ca) de Solos Arenosos e Argilosos	64
5.4.4. Efeito da Aplicação de Corretivo no Magnésio (Mg) de Solos Arenosos e Argilosos.	67
5.4.5. Efeito da Aplicação de Corretivo no Fósforo (P) de Solos Arenosos e Argilosos	70
5.5. DESEMPENHO AGRONÔMICO DO FEIJÃO	73
5.5. NUTRIENTES NO GRÃO DO FEIJÃO	76
5.6. PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO APÓS A COLHEITA DO FEIJÃO	80

6.CONCLUSÕES.....	84
7.RECOMENDAÇÕES.....	86
8.REFERÊNCIAS.....	87

1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 70% do consumo mundial de água doce corresponde à sua utilização na agricultura (Banco Mundial, 2022). Tanto o solo quanto a água são usados simultaneamente em sistemas agrícolas. Por sua vez, este tipo de sistema leva à perda de habitat devido à conversão de ambientes naturais terrestres em solos agricultáveis (Brudvig et al., 2009).

Dentro do mesmo tema, a acidificação é um processo natural dos solos, promovido por diferentes causas, incluindo a mineralização da matéria orgânica, a diminuição de bases trocáveis no solo (Ca, Mg e K) pela absorção da planta, a aplicação de fertilizantes à base de nitrogênio e enxofre e a presença de alumínio trocável devido à evolução genética do solo (Lora, 2010). Rodrighero et al. (2015), mencionam que o calcário é o corretivo de acidez mais utilizado na agricultura.

Por outro lado, a hidroponia está revolucionando as técnicas de produção agrícola em todo o mundo, devido ao mínimo impacto ecológico, melhor controle de pragas e alto rendimento de produção. No entanto, as soluções nutritivas residuais geradas a partir de sistemas hidropônicos contêm altas concentrações de N e P, além disso, são descartados em ambientes superficiais e subterrâneos, o que leva à eutrofização e consequente degradação dos ecossistemas (Kwon et al., 2021).

As tecnologias atuais para tratamento de águas residuais hidropônicas, como ultrafiltração e osmose reversa, são eficientes (Koide e Satta, 2004), mas têm altos custos operacionais e de manutenção em comparação com sistemas extensivos de tratamento de águas residuais. Dentro das novas tecnologias para o tratamento de água contaminada, os processos de adsorção têm grande potencial (Dabrowski, 2001), caracterizado pelo uso de materiais baratos, não tóxicos e biodegradáveis em alguns casos (Vanreppelen et al., 2013).

Boeykens et al. (2017), demonstraram que um material de baixo custo, a calcário dolomítico (uma rocha sedimentar composta principalmente de carbonatos de cálcio e magnésio), é um adsorvente eficiente de fosfato de soluções aquosas, contendo outros contaminantes. No entanto, uma vez saturado o adsorvente com o contaminante, ele pode ser considerado resíduo, gerando um novo problema ambiental se não for descartado adequadamente (Han et al., 2009). Neste sentido, Piol et al. (2019), estudaram o processo de dessorção de fosfato para a recuperação e reutilização da calcário dolomítico saturado e aplicação do fosfato dessorvido como fertilizante, para melhorar o solo agrícola. A biodisponibilidade de fosfato do calcário dolomítico saturado foi avaliado com

microrganismos autóctones. Os autores concluíram que o material não é fitotóxico e desse modo, poderia promover o crescimento vegetal.

Atualmente, o conceito de economia circular é promovido mundialmente como uma abordagem inovadora, o qual tem como base identificar onde estão os produtos no final de sua vida útil ou os resíduos de processos de produção que podem ser empregados como recursos valiosos para a fabricação de produtos renováveis e de valor agregado (Geissdoerfer et al., 2017). A economia circular é reconhecida como uma estratégia altamente eficaz tanto para o desenvolvimento de políticas como para a redução da poluição ambiental e das emissões de gases com efeito de estufa (De Pascale et al., 2021; Durán-Romero et al., 2020), a fim de combater as mudanças climáticas. Nesse sentido, os adsorventes saturados nos processos de adsorção representam um conjunto de recursos inexplorados, que podem ser empregados como fertilizantes ou corretivos para manter a fertilidade do solo. Por esse motivo, no presente estudo, foi avaliado o reuso do calcário dolomítico saturado com nutrientes adsorvidos do efluente hidropônico, como corretivo e fertilizante em solos agrícolas e seu impacto no desempenho agrônômico do feijão.

Considerando o conceito de economia circular, pretende-se melhorar a fertilidade química do solo, valorizando o resíduo gerado durante o processo de adsorção, por meio de sua reutilização. Desta forma, um material carregado de nutrientes é reaproveitado como corretivo de solo e fertilizante, o que significaria uma otimização na gestão de recursos e moderação na aplicação de fertilizantes comerciais, pois a aplicação extensiva e ineficiente de fertilizantes químicos a longo prazo pode causar efeitos adversos, como degradação das propriedades do solo, desequilíbrio de nutrientes e aumento da poluição ambiental, afetando assim o equilíbrio agroecológico (Miao et al., 2023; Zhu et al., 2023).

Assim, a presente tese enquadra-se na linha de pesquisa de tecnologias e processos sustentáveis do PPGIES, e ODS 6 em termos de tratamento de água e saneamento. Além disso, por meio da abordagem da economia circular, procura-se prolongar a vida útil dos subprodutos residuais e contribuir para o ODS 12 em quanto a gestão eficiente dos recursos naturais, conseqüentemente, melhorar as capacidades de adaptação frente à crise climática (ODS 13).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As seções seguintes deste capítulo abordam as características físico-químicas do solo que influenciam a fertilidade e seu manejo geral. A economia circular também é contextualizada e são apresentados métodos alternativos de correção e fertilização do solo. Por fim, são elucidados os processos de adsorção e o uso do calcário dolomítico para o tratamento de águas contaminadas.

2.1. NUTRIENTES MINERAIS DO SOLO

As plantas obtêm macronutrientes e micronutrientes naturalmente do solo. Segundo Batista (2018), os macronutrientes são N, P, K, Ca, Mg e S; por sua vez, os micronutrientes são B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn. Os macronutrientes podem ainda ser divididos em macronutrientes primários (N, P e K), são assim denominados porque as plantas tendem a usar em maior quantidade e por se tornarem deficientes mais rapidamente nos solos e os macronutrientes secundários (Ca, Mg e S), são necessários em quantidades menores do que os primários e tornam-se deficientes no solo mais lentamente.

Um ou vários nutrientes podem estar ausentes no solo ou em quantidades reduzidas ou mesmo em alguma forma que as raízes das plantas não conseguem absorver. Para isso torna-se necessário o uso de técnicas de manejo adequadas de solo para que os nutrientes fiquem disponíveis às plantas, ou a reposição dos mesmos quando necessário (Ronquim, 2020).

É necessário a melhor condição nutricional possível para que as culturas expressem seu potencial produtivo. Essa condição é adquirida quando o solo apresenta um equilíbrio com relação aos teores dos nutrientes disponíveis para as plantas. Por sua vez, tudo isso pode ser alcançado através do manejo da adubação. A prática da calagem e a gessagem, por exemplo, possibilitam ajuste do pH, diminuição da atividade do Al tóxico às plantas e fornecimento de Ca, Mg e S para as mesmas. O fornecimento dos demais nutrientes pode ser realizado por meio de adubações que podem ser divididas em orgânica, organomineral e mineral. Nesse sentido, independentemente do manejo químico adotado, sua recomendação deve considerar duas regras básicas: a) os atributos do solo anterior à adoção do manejo, mensurada por meio da análise química do solo e b) a necessidade da cultura (Batista, 2018).

2.2. CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS (CTC), SOMA DE BASES (SB) E SATURAÇÃO POR BASES (V%)

Um dos componentes mais importantes dos solos são os coloides. Coloides são partículas minerais (argilas) ou partículas orgânicas (matéria orgânica sintetizada a partir da decomposição), cuja característica é apresentar em sua superfície cargas elétricas diferentes de zero, tanto negativas quanto positivas. Em função do excesso de cargas negativas dos coloides, a adsorção é principalmente de cátions (Ronquim, 2020).

O mesmo autor menciona que "a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) de um solo representa a quantidade total de cátions em condição permutável ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) retidos na superfície".

A CTC indica a quantidade de íons positivos que o solo é capaz de reter em determinadas condições e permutar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros cátions, em função da intensidade de cargas negativas que se manifesta nos coloides (Villar, 2007). Portanto, a CTC depende da quantidade e do tipo de argila e de matéria orgânica presentes no solo. Os solos com alto teor de argila e matéria orgânica podem reter mais cátions trocáveis. Além disso, o pH do meio pode alterar fortemente esse parâmetro; esse efeito decorre principalmente da dissociação dos radicais orgânicos ou sesquióxidos de ferro e alumínio, além da desobstrução de cargas da matéria orgânica ocupadas por Al^{3+} , Fe^{2+} e Mn^+ (Ronquim, 2020). A CTC é medida em termos de centimols de carga por decímetro cúbico de solo e é escrita como $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (Lopes, 1998).

A CTC pode ser expressa como "CTC total" quando considerar todos os cátions permutáveis do solo ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$). Indica a quantidade total de cargas negativas que o solo poderia apresentar se o seu pH fosse 7 (Prezotti e Guarçoni, 2013). Quando a CTC é expressa sem considerar o íon H^+ ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Al}^{3+}$) a denominação é "CTC efetiva".

De acordo com Ronquim (2020), um solo é considerado bom para nutrir as plantas quando a maior parte da CTC do solo está ocupada por cátions essenciais, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Entretanto, se grande parte da CTC está ocupada por cátions potencialmente tóxicos, como H^+ e Al^{3+} , o solo é considerado pobre (Quadro 1).

Quadro 1. Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e suas implicações práticas.

CTC elevada	CTC baixa
Alta porcentagem de argila e, ou, alto teor de matéria orgânica.	Baixa porcentagem de argila ou baixo teor de matéria orgânica.
Maior quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH.	Menor quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH.
Maior capacidade de retenção de nutrientes a uma certa profundidade.	Nitrogênio e potássio lixiviam mais.
Maior capacidade de retenção de umidade.	Menor capacidade de retenção de umidade.

Fonte: Adaptado de Potash & Phosphate Institute (1995), citado por Ronquim (2020, p. 12).

Um valor baixo de CTC indica que o solo tem pequena capacidade para reter cátions sem forma trocável, o que pode resultar em perdas por lixiviação. Por tanto, apresentam baixa capacidade tampão, isto é, menor resistência à variação do pH. Nesse caso, recomenda-se adubações e calagens em pequenas quantidades, de forma parcelada (Prezotti e Guarçoni, 2013).

Continuando com o segundo termo, a soma de bases trocáveis (SB) de um solo, representa a soma dos teores de cátions permutáveis, com valores expressos em cmol/dm^3 . Reflete a soma de Ca, Mg, K e, se for o caso, também o Na, todos na forma trocável no complexo de troca de cátions do solo. A SB dá uma indicação do número de cargas negativas dos coloides que está ocupado por bases (Villar, 2007).

Denomina-se saturação por bases (V%) à soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions (Ronquim, 2020). Esse parâmetro reflete, em termos percentuais, quantos dos pontos de troca de cátions potencial do complexo coloidal do solo estão ocupados por bases (Equação 1). A mesma é influenciada pela acidez e varia de acordo com o tipo de solo (Lozada, 2015).

$$V(\%) = \frac{100 \times SB}{CTC} \quad (\text{Equação 1})$$

De acordo com Villar (2007), a saturação por bases dá indício das condições gerais de fertilidade do solo, sendo utilizada até como complemento na nomenclatura dos solos, pois podem ser divididos em eutróficos e distróficos. Os solos de alta saturação são chamados eutróficos e apresentam $V\% > 50\%$ e são considerados os mais férteis, enquanto os de baixa saturação são chamados de distróficos, considerados como menos férteis, possuindo $V\% < 50\%$.

2.3. ACIDEZ DO SOLO

Um ácido é uma substância que tende a liberar prótons (H^+). Por outro lado, uma base é aquela que aceita prótons. Considerando esses princípios químicos, a acidez

no solo é determinada pela medição da atividade de H^+ na solução do solo e é expressa como potencial hidrogeniônico (pH) (Espinosa e Molina, 1999).

A redução do pH afeta as características químicas e biológicas do solo, reduz o crescimento das plantas e diminui a disponibilidade de nutrientes como cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e potássio (K). Isso, por sua vez, favorece a acumulação de elementos tóxicos para as plantas, como alumínio (Al^{3+}) e manganês (Mn) (Bertsch, 1998).

Conforme Lopes, Silva e Guilherme (1991), os solos podem ser naturalmente ácidos devido à própria deficiência em bases do material de origem, ou a processos de formação que favorecem a remoção de elementos básicos como K, Ca, Mg, Na, etc. Além disso, os cultivos e adubações podem aumentar a acidez nos solos.

2.4. CLASSIFICAÇÃO DA ACIDEZ

Segundo Quaggio e Raij (2001), a acidez do solo pode ser representada por meio da acidez ativa e da acidez potencial, esta última subdivide-se em acidez trocável e acidez não trocável.

Denomina-se acidez ativa a parte do hidrogênio que está dissociada, ou seja, na solução do solo, na forma de H^+ e é expressa em valores de pH (Catani e Gallo, 1955). A atividade dos íons H^+ em suspensão é determinada com água ou solução salina ($CaCl_2$) (Meneghetti, 2018). O Quadro 2 apresenta a classificação da acidez do solo para os dois métodos de análise (Oleynik et al., 1998).

Quadro 2. Classificação da acidez do solo.

Classificação da acidez	pH em água	pH em $CaCl_2$ 0,01 M
Muito alta	<5,0	<4,3
Alta	5,0 - 5,6	4,4 - 5,0
Média	5,7 - 6,1	5,1 - 5,5
Baixa	6,2 - 6,6	5,6 - 6,0
Muito baixa	>6,6	>6,0

Fonte: Oleynik et al. (1998), citado por Meneghetti (2018, p. 62).

A acidez potencial, representada pela soma da acidez trocável com a acidez não trocável, corresponde a àquela acidez neutralizada até um determinado valor de pH. A acidez trocável, faz referência aos íons Al^{3+} e H^+ que estão retidos na superfície dos coloides por forças eletrostáticas. A acidez não trocável é representada pelo H^+ de ligação covalente, associado aos coloides com carga negativa variável (Teixeira et al., 2017).

2.5. CORREÇÃO DA ACIDEZ

Segundo Ronquim (2020), a correção ou calagem, no solo tropical, deve

influir sobre a soma de bases (SB), por conseguinte elevando a disponibilidade de nutrientes e aumentando o complexo de troca para as plantas e o valor da CTC efetiva.

A calagem baseia-se na aplicação de sais básicos que neutralizam a acidez causada pela presença de Al^{3+} e H^+ no solo. A decisão de realizar calagem no solo deve considerar o tipo de corretivo a ser utilizado, bem como a época, a dose e a forma de aplicação (Espinosa e Molina, 1999; Fageria e Baligar, 2008). Esta prática estimula o crescimento das plantas, reduzindo a toxicidade de Al e Mn e aumentando a disponibilidade de nutrientes como Ca, N, P e Mo (Espinosa e Molina, 1999).

2.6. CLASSIFICAÇÃO DE CORRETIVOS

São considerados corretivos da acidez do solo os materiais que contêm teores mínimos de cálcio e de magnésio como constituintes (Alcarde e Rodella, 1996). Conforme Brasil (2006), os corretivos da acidez dos solos são classificados da seguinte forma:

2.6.1. Calcário

É o corretivo mais comum. Seus constituintes neutralizantes são o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o carbonato de magnésio ($MgCO_3$). O material é obtido pela moagem de rocha calcária.

O Quadro 3 apresenta a classificação dos calcários quanto à concentração de CaO e MgO.

Quadro 3. Classificação dos corretivos quanto a concentração de CaO e MgO.

Calcário	CaO (%)	MgO (%)
Calcítico	≥ 40	≤ 5
Magnesiano	30-40	5-12
Dolomítico	25-30	≥ 12

Fonte: Brasil (2006).

2.6.2. Cal Virgem Agrícola

O material se obtém na indústria pela calcinação completa da rocha calcária. Seus componentes são óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). A cal virgem libera Ca^{2+} , Mg^{2+} , OH^- e calor. A liberação de OH^- é rápida, conferindo o caráter de base forte.

2.6.3. Cal Hidratada Agrícola

É obtido industrialmente hidratando a cal virgem. Sua ação neutralizante

se assemelha à da cal virgem, a diferença é que a cal virgem se hidrata com a água contida no solo.

2.6.4. Calcário Calcinado

O corretivo é obtido na indústria pela calcinação parcial do calcário. Por consequência, nem todo o CaCO_3 e o MgCO_3 são decompostos e transformados em óxidos. É considerado como um produto de características intermediárias ao calcário e à cal virgem.

2.6.5. Calcário “Filler”

É um calcário que apresenta granulometria fina e apresenta características de neutralização iguais ao calcário em relação aos atributos químicos.

2.6.6. Escórias de Siderurgia

Trata-se de subprodutos da indústria do ferro e do aço. Seus componentes neutralizantes são os silicatos de cálcio e de magnésio. Exibem comportamento semelhantes aos calcários e contêm teores relativamente elevados de micronutrientes.

2.6.7. Outros Materiais

Materiais como margas (depósitos terrestres de CaCO_3), calcários marinhos (corais, sambaquis) e subprodutos de diversas indústrias podem ser usados como corretivos. A ação neutralizante é parecida à do carbonato de cálcio dos calcários.

Os materiais utilizados para corrigir a acidez do solo tropical são encontrados na natureza em forma de rocha, passam pelo processo de trituração e peneiramento para aplicação no solo. Uma vez que é aplicado o calcário, ocorre a neutralização do alumínio trocável, aumentando a saturação por bases (V%). Por consequente, com a neutralização de parte do hidrogênio adsorvido, ocorre elevação do pH do solo. A maioria dos calcários comercializados requer um período mínimo de três meses para reagir completamente (Ronquim, 2020).

2.7. CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE DOS CORRETIVOS

Os materiais que são oferecidos como neutralizantes da acidez do solo possuem características e qualidades que interferem na sua eficiência agrônômica. Conforme Primavesi, A.C. e Primavesi, O. (2004), as características relacionadas com a qualidade dos corretivos da acidez do solo são: teor de neutralizantes, tamanho das partículas, forma química dos neutralizantes, e variedade e conteúdo de nutrientes.

2.7.1. Poder de Neutralização

Segundo Quiroga (2014), o poder de neutralização (PN) do corretivo, refere-se a sua capacidade de neutralizar a acidez do solo, o que dependerá de sua composição química e grau de pureza.

A pureza do corretivo é geralmente expressa como um equivalente químico (EQ) ou poder de neutralização (PN), que é uma medida do poder neutralizante de um corretivo de acidez em particular. Portanto, o EQ ou PN é definido como a capacidade do corretivo em neutralizar a acidez do solo em comparação com o poder neutralizante do CaCO_3 quimicamente puro (Bernier e Alfaro, 2006), ao qual é atribuído um valor de 100%.

O Quadro 4 mostra os valores do poder de neutralização de vários materiais de calagem, em sua forma pura. Dentre os corretivos, o óxido de magnésio é a forma química mais eficiente para neutralizar a acidez do solo (Espinosa e Molina, 1999).

Quadro 4. Equivalentes químicos ou poder neutralizante de diferentes materiais puros usados como corretivo.

Material	Equivalente Químico (EQ)
Carbonato de cálcio	100
Dolomita	108
Óxido de cálcio	179
Hidróxido de cálcio	138
Hidróxido de magnésio	172
Carbonato de magnésio	119
Óxido de magnésio	248
Silicato de cálcio	86
Silicato de magnésio	100

Fonte: Adaptado de Espinosa e Molina (1999, p. 6).

2.7.2. Tamanho das Partículas

A eficiência dos materiais de calagem dependerá do tamanho das partículas, pois a velocidade de reação está diretamente relacionada à área superficial de contato da partícula com o solo (Quiroga, 2014).

Quanto menor o tamanho das partículas, maior a superfície de contato com o solo. Isso é chamado de área superficial específica. Quanto mais superfície específica um corretivo apresentar, mais rápido ele reage ao contato com o solo (Bernier e Alfaro, 2006).

Quando uma certa quantidade de calcário é misturada com o solo, sua velocidade de reação e grau de reatividade (RE) são determinados pelo tamanho das partículas. As partículas finas de calcário reagem com mais rapidez (Potash & Phosphate Institute, 1995).

Para as distintas frações granulométricas do calcário, foram determinadas diferentes taxas de reatividade (percentual de reação do calcário no período de três meses), em peneiras de tamanhos diferentes segundo a ABNT, conforme Quadro 5.

Quadro 5. Taxas de reatividade de partículas de diferentes tamanhos de calcários.

Fração granulométrica		Taxa de reatividade - RE (%)
Peneira N° (ABNT)	Dimensão (mm)	
>10	>2	0
10-20	2-0,84	20
20-50	0,80-0,30	60
<50	<0,30	100

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Fonte: Alcarde (1992).

2.7.3. Poder Relativo de Neutralização Total

O Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) é utilizado na determinação da quantidade de calcário a ser aplicado ao solo. Refere-se, ao índice que relaciona a percentagem expressa do PN relativo às características químicas, multiplicado pela RE, relacionando com as características físicas do corretivo dividindo esse valor por 100, resultando no valor final. O valor define a proporção de corretivo que neutraliza efetivamente a acidez após 3 meses. A equação do PRNT pode ser expressa da seguinte forma (Brasil, 2006):

$$PRNT (\%) = \frac{PN \times RE (\%)}{100} \quad (\text{Equação 2})$$

Segundo Brasil (2006), os calcários são classificados em classes quanto ao PRNT, os quais são detalhados no Quadro 6.

Quadro 6. Classificação dos calcários segundo PRNT.

Classes	Faixas de PRNT
A	PRNT entre 45% e 60%.
B	PRNT entre 60,1% e 75%.
C	PRNT entre 75,1% e 90%.
D	PRNT superior a 90,1%.

Fonte: Brasil (2006).

2.8. RECOMENDAÇÃO DE CALAGEM

Conforme Ronquim (2020, p. 17) "o critério mais seguro para recomendar a dose de calcário é aquele em que se procura elevar a porcentagem de saturação em bases (V%) a um valor adequado para a cultura nos solos tropicais". Na fórmula, expressa na equação 3, são considerados parâmetros referentes ao solo, corretivo e cultura específica

(Lopes, Silva e Guilherme, 1991). A quantidade de calcário é calculada para aumentar a porcentagem de cátions que condicionam os valores de CTC, geralmente para o Sul e Sudeste do Brasil é 70% e 50% no Cerrado brasileiro.

$$NC = T(V_2 - V_1) \% PRNT \% 10 \times p \quad (\text{Equação 3})$$

NC= necessidade de cal, em t ha⁻¹.

T= CTC= capacidade de troca catiônica (mmol_c/dm³).

V₂= % de saturação em bases desejada (dependendo da cultura, entre 50-70).

V₁= % de saturação em bases encontrada pela análise de solo.

PRNT= poder relativo de neutralização total do calcário (o qual é provido pelo distribuidor do calcário). Como a CTC é expressa em mmol_c/dm³, o valor de PRNT deve ser dividido por 10 (como está na equação).

p= fator de profundidade de incorporação do calcário (1 para 0-20 cm ou 1,5 para 0-30 cm) (Ronquim 2020).

2.9. BENEFÍCIOS DA CALAGEM

A calagem adequada é uma das práticas que mais benefícios apresenta ao agricultor, dentre os quais mencionam-se os seguintes: aumento do pH, melhoria de propriedades físicas de alguns solos (proporcionando melhor aeração, circulação de água, favorecendo o desenvolvimento das raízes das plantas), neutralização do alumínio e manganês tóxicos, aumento dos teores de cálcio e magnésio, aumento da disponibilidade de fósforo e molibdênio, aumento da atividade de microrganismos e a liberação de nutrientes pela decomposição da matéria orgânica, tais como nitrogênio, fósforo, enxofre e boro (Lopes, Silva e Guilherme, 1991).

2.10. EQUILÍBRIO NA ABSORÇÃO DE NUTRIENTES

De acordo com Villar (2007), cada nutriente desempenha uma função definida na planta, e nenhum pode ser completamente substituído por outro. Mesmo que, cada elemento exerça certas funções específicas, todos devem estar presentes para produzir melhores resultados. Conforme a Lei do Mínimo de Liebig, o efeito de cada nutriente no crescimento da planta, depende da reserva dos outros elementos essenciais.

No solo, os nutrientes estão interligados e têm proporções estritas entre si. O excesso de um nutriente é relativo às quantidades dos outros elementos encontrados no solo, e a carência é sempre considerada para o elemento que se apresenta no nível mais baixo

no momento (Ronquim, 2020). No Quadro 7, são apresentadas as principais relações entre nutrientes no solo.

Quadro 7. Principais relações envolvendo adições de macronutrientes em excesso no solo que podem provocar a inibição de micronutrientes e fósforo.

Nutriente em excesso	Principal deficiência induzida
NH ₄	Cu
NO ₃	Mo
P	Zn
K	B
Ca	Mn
Mg	Cu
S	P

Fonte: Adaptado de Bergmann (1973), citado por Ronquim (2020, p. 19).

As interações entre nutrientes podem ser negativas (inibição) ou positivas (sinergismo). Em situações de inibição, a presença de um elemento diminui a absorção de outro elemento, enquanto no sinergismo, a presença de um elemento favorece a absorção de outro elemento, proporcionando um efeito benéfico para a planta (Silva e Trevizam, 2015). No Quadro 8, são apresentadas as relações dos efeitos de um íon sobre a absorção de outro.

Quadro 8. Principais relações dos efeitos de um íon sobre a absorção de outro.

Íon	Inibição
Mg ²⁺ , Ca ²⁺	K ⁺
H ₂ PO ₄ ⁻	Al ³⁺
K ⁺ , Ca ²⁺	Al ³⁺
H ₂ BO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺
K ⁺	Ca ²⁺ (alta concentração)
SO ₄ ²⁻	SeO ₄ ²⁻
SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
Zn ²⁺	Mg ²⁺
Zn ²⁺	Ca ²⁺
Zn ²⁺	H ₂ BO ₃ ⁻
Fe ²⁺	Mn ²⁺
Zn ²⁺	H ₂ PO ₄ ⁻
Cu ²⁺	MoO ₄ ²⁻
Íon	Sinergismo
K ⁺	Ca ²⁺ (baixa concentração)
MoO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻

Fonte: Adaptado de Malavolta et al. (1989), citado por Ronquim (2020, p. 20).

Como a solução do solo apresenta heterogeneidade de íons, a presença de um pode alterar a taxa de absorção de outro. Nesse sentido, é muito importante manter níveis equilibrados desses cátions no solo para evitar a indução de deficiência de alguns deles nas culturas, o qual se consegue através de calagem e adubação adequadas (Ronquim, 2020).

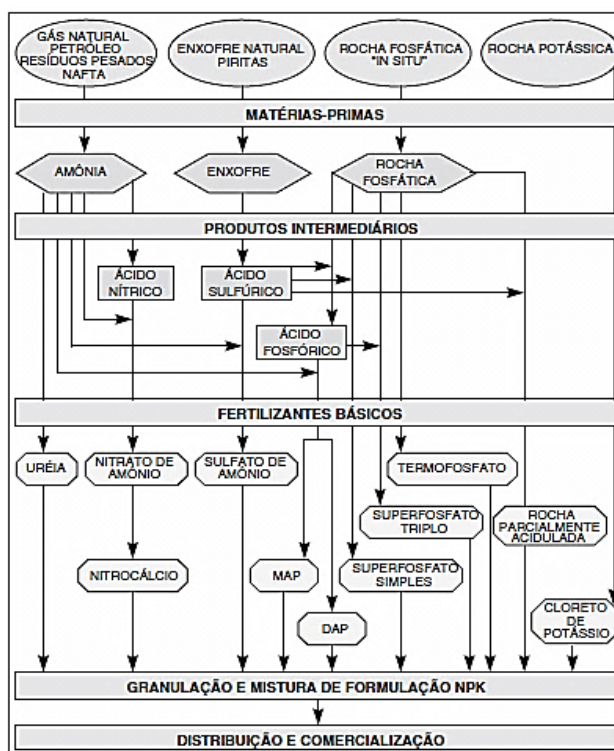
2.11. FERTILIZANTES QUÍMICOS MINERAIS: PROCESSO PRODUTIVO E ASPECTOS AMBIENTAIS

Como mencionado anteriormente, uma das formas de repor os nutrientes ausentes no solo é por meio do uso de fertilizantes químicos minerais.

Segundo Dias e Fernandes (2006), as deficiências mais comuns que se apresentam no solo são de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), daí a fórmula básica dos fertilizantes, NPK, que indica o percentual de nitrogênio na forma de N elementar, o teor percentual de fósforo na forma de pentóxido de fósforo (P_2O_5), e o conteúdo percentual de potássio na forma de óxido de potássio (K_2O). Esses três nutrientes estão presentes na composição do enxofre, da amônia, da rocha fosfática e da rocha potássica, que são extraídos diretamente da natureza ou elaborados como subproduto da extração de outros elementos minerais, como o petróleo e o gás natural. A formulação dos fertilizantes é elaborada a partir da combinação desses três elementos básicos, em proporções que atendam a exigência do solo e cultura a ser produzida.

A Figura 1, esquematiza toda a cadeia produtiva de fertilizantes minerais, envolvendo atividades desde a extração da matéria-prima até a composição de formulações aplicadas diretamente na agricultura.

Figura 1. Cadeia Produtiva dos Fertilizantes.



Fonte: Dias e Fernandes (2006, p. 100).

Com relação a aspectos ambientais na fabricação de fertilizantes, os mesmos autores mencionam que deve ser feito um estudo e um trabalho cuidadoso do terreno para não atingir o lençol freático, principalmente, com as águas residuais ácidas que percolam através do gesso, tendo em conta o subproduto gesso - sulfato de cálcio, como consequência da solubilização da rocha fosfática com ácido sulfúrico na fabricação do ácido fosfórico. Além disso, o controle dos efluentes líquidos e gasosos devem merecer muita atenção, incluindo os efluentes alcalinos líquidos amoniacais e ácidos (principalmente fosfórico) e as emissões gasosas dos óxidos de enxofre e nitrogênio das fábricas de ácido sulfúrico e nítrico. Também as emissões de particulados, como as da fabricação de nitratos e carbonatos, bem como as das instalações de granulação.

2.12. HIDROPONIA

Tanto o solo quanto a água são usados simultaneamente em sistemas agrícolas baseados no solo, levando à perda de habitat devido à conversão de ambientes terrestres naturais em terras agrícolas (Brudvig et al., 2009). Nesse sentido, a hidroponia é considerada uma forma alternativa de superar o problema citado (Sambo et al., 2019).

Na hidroponia, as culturas são cultivadas sem solo e os elementos minerais essenciais são fornecidos a partir da solução nutritiva, que são disponibilizados na forma iônica e como tal são absorvidos pelas raízes. Esses nutrientes são dotados de movimentação no ambiente radicular, favorecendo sua absorção (Beltrano e Gimenez, 2015).

Uma das chaves para o sucesso do cultivo hidropônico é a composição da solução nutritiva, que deve conter todos os elementos mencionados anteriormente, em quantidades adequadas para que cumpram corretamente o papel que desempenham no metabolismo da planta.

O cultivo hidropônico requer grandes quantidades de água e fertilizantes químicos para otimizar a produção das plantas. Conseqüentemente, este tipo de agricultura produz grandes quantidades de fontes pontuais de poluição altamente concentradas em nitrato ($200-300 \text{ mg NO}_3^- \text{ N L}^{-1}$) e fosfato ($30-100 \text{ mg PO}_4^{3-} \text{ P L}^{-1}$), (Park et al., 2008; Prystay e Lo, 2001). Além disso, as soluções nutritivas residuais (WNS, siglas em inglês) são descartadas em ambientes superficiais e subterrâneos, o que leva à eutrofização e conseqüente degradação dos ecossistemas (Kwon et al., 2021).

A busca por sistemas que reduzam a concentração de nutrientes em corpos d'água é um bom ponto de partida para tentativas de solucionar problemas de eutrofização e alcançar a recuperação dos sistemas aquáticos afetados. Nesse sentido, as tecnologias atuais

para águas residuais hidropônicas, como ultrafiltração e tratamento de osmose reversa, são eficientes (Koide e Satta, 2004), mas têm altos custos operacionais e de manutenção em comparação com sistemas extensivos de tratamento de águas residuais.

Várias tecnologias de remoção de N e P também foram investigadas, especificamente para soluções nutritivas de águas residuais (WNS) de estufas ou sistemas hidropônicos de interior (Adler et al., 2000; Gagnon et al., 2010; Miyama et al., 2009; Saxena e Bassi, 2013). Por exemplo, Pouladi et al. (2016), estudaram em escala piloto o potencial de sistemas de dessalinização usando várias espécies de plantas em reatores de fluxo contínuo para o tratamento de WNS. Os autores verificaram que o tratamento posterior do efluente foi necessário para atender às diretrizes de qualidade da água de irrigação. Além disso, o longo tempo de retenção hidráulica (3,7 dias) e a alta salinidade após o tratamento sugerem que este tipo de sistema requer diversos estudos. Outros estudos recentes mostraram a possibilidade de tratar um efluente de estufa contendo altas concentrações de N e P, usando áreas úmidas construídas do tipo mesocosmo (Gagnon et al., 2010) e áreas úmidas construídas de fluxo subterrâneo em escala de laboratório (Chang et al., 2017; Park et al., 2015; White, 2013). Recentemente, Rodziewicz et al. (2019), estudaram um contator biológico rotativo (RBC) e um contator eletrobiológico rotativo (REBC) como sistema de tratamento de águas residuais para sistemas hidropônicos. Eles observaram que a tecnologia REBC pode remover N entre 53,4% e 68,6% sob maior tempo de retenção hidráulica. No entanto, a maioria desses estudos investigou tecnologias de tratamento passivo que requerem uma grande área de tratamento, bem como um longo tempo de retenção.

Kwon et al. (2021), monitoraram as concentrações de nutrientes em WNS de 10 fazendas hidropônicas de tomate, pimenta e morango (estufas) por até seis meses. Também testaram um sistema de reator em lote de sequenciamento (SBR) em escala piloto como uma tecnologia potencial para o tratamento de WNS. O sistema SBR apresentou eficiência de remoção de DBO, DQO, nitrato e fosfato de 100; 100; 89,5 e 99,8%, respectivamente. Além disso, o sistema SBR removeu outros cátions como Ca^{2+} , Fe dissolvido, K^+ , Mg^{2+} e Na^+ , e as eficiências de remoção para esses íons foram de 48; 67; 18; 14 e 15%, respectivamente. Portanto, o SBR mostrou-se muito promissor como alternativa de tratamento para contaminantes WNS provenientes de sistemas hidropônicos.

2.13. ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular pode ser definida como uma abordagem de desenvolvimento sustentável que visa maximizar os benefícios econômicos e, ao mesmo

tempo, minimizar a pressão sobre os recursos renováveis (Prieto-Sandoval, Jaca e Ormazabal, 2017). Este termo representa uma mudança de paradigma que enfatiza a revalorização de componentes valiosos de um produto, permitindo que sejam reciclados no final da sua vida útil e reutilizados para a fabricação de outros artigos (Adibi et al., 2017).

Borrello et al. (2017), mencionam que o modelo de economia circular aplica materiais reciclados à produção de alimentos para reduzir a utilização de recursos externos. Existem muitas oportunidades para uma economia circular na produção de alimentos. Na produção agrícola, por exemplo, em Almería (Espanha), convertem resíduos vegetais em composto, bioetanol e outros produtos biológicos (Aznar-Sánchez et al., 2020). A formulação de um condicionador de solo composto por resíduo de bauxita (BR) e resíduo orgânico de dendezeiro, como matéria-prima, foi recentemente proposta como uma estratégia inovadora para a correção de solos ácidos brasileiros (Leite et al., 2022).

Os resíduos são reconhecidos como um recurso que apresenta um potencial significativo para a gestão sustentável de águas residuais no setor da água (Banaité, 2016). Nesse sentido, a energia do lodo de esgoto sanitário pode ser aproveitada e os nutrientes recuperados, podendo ser utilizados para aplicações agrícolas (Cooper e Gutowski, 2017).

O Parlamento Europeu (2017), promove a utilização de materiais reciclados para a produção de fertilizantes, em busca da economia circular. Além disso, estima que cerca de 30% dos fertilizantes minerais podem ser substituídos por resíduos. Porém, a utilização de resíduos na agricultura deve cumprir os requisitos da legislação, garantindo a segurança alimentar e ambiental.

Conforme a Instrução Normativa Nº 35, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil (Brasil, 2006), os condicionadores de solo são uma classe de produtos utilizados para melhorar as atividades físicas, físico-químicas ou biológicas do solo, podendo recuperar solos perturbados ou desequilibrados nutricionalmente. A Seção V do mesmo documento prevê a utilização de matérias-primas provenientes do tratamento de despejos sanitários na produção de condicionadores de solo.

2.14. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA CORREÇÃO E FERTILIZAÇÃO DE SOLOS

Como mencionado anteriormente, o calcário é o material mais utilizado para correção da acidez do solo, devido ao seu preço e capacidade de aumentar a eficiência dos fertilizantes aplicados na produção de grãos (Fageria e Baligar, 2008). No entanto, o calcário não é muito solúvel, e seus componentes dissociados mostram mobilidade limitada.

Além disso, os efeitos da calagem são geralmente restritos a camadas superficiais do solo quando o solo não é lavrado (Castro, Calonego e Crusciol, 2011; Soratto e Crusciol, 2008).

Outros materiais também podem ser aplicados para correção da acidez do solo, desde que o produto contenha componentes neutralizantes, como óxidos de cálcio e/ou magnésio, hidróxidos, carbonatos e silicatos (Castro e Crusciol, 2013). Nesse sentido, Castro et al. (2015), estudaram os efeitos da aplicação superficial de calcário dolomítico e silicato de cálcio-magnésio em soja e milho em rotação com adubo verde em uma região tropical. O silicato corrigiu a acidez do solo e aumentou a capacidade de troca no solo a maiores profundidades, mais rapidamente do que o dolomítico. A aplicação de ambos os materiais de correção de acidez aumentou as concentrações foliares de N, Ca e Mg em soja; mas no milho, só o silicato aumentou o N.

A fim de obter informações básicas sobre fontes e doses de corretivos eficientes e de ação imediata, foi realizada uma investigação onde foi avaliado o efeito da aplicação de quatro corretivos em diferentes dosagens sobre o crescimento de uma planta indicadora (trigo) em estufa. Os corretivos foram: carbonato de cálcio, dolomita, óxido de cálcio e carbonato de magnésio. Os resultados das análises de solo para avaliar o efeito das doses dos corretivos sobre o comportamento do pH, acidez trocável e alumínio trocável mostraram que todos os corretivos utilizados tiveram o mesmo comportamento. O maior acúmulo de matéria verde e matéria seca da planta indicadora foi alcançado com o uso de dolomita e carbonato de cálcio (Calva e Espinoza, 2017).

Outro estudo, avaliou os efeitos da aplicação de diferentes corretivos calcários (dolomítico, algas calcárias, algas calcárias com 1/3 da dose recomendada e dois calcários experimentais) nas propriedades químicas e biológicas de dois solos incubados (arenosos e argilosos). Com exceção do calcário marinho com dose reduzida, os corretivos calcários com as doses utilizadas neutralizaram a acidez no solo arenoso. Ao contrário, no solo argiloso nenhum tratamento foi eficiente em neutralizar a acidez. O aumento do pH não contribuiu para o aumento da população de *Bradyrhizobium sp.*, nos solos incubados (Samudio, 2020).

Como um passo à frente no uso de resíduos, uma significativa quantidade de estudos focados na recuperação de nutrientes despertou com a filosofia de transformar resíduos em recursos, por meio da reciclagem e reutilização.

Quando o lodo de esgoto é tratado e processado (conhecido como biossólido), este adquire características permissíveis para o uso agrícola de maneira

ambientalmente segura. De acordo com Bettiol e Camargo (2000), o uso agrícola do lodo de esgoto como adubo orgânico é considerado uma alternativa promissora de disposição desse resíduo. Por ser rico em matéria orgânica e em macro e micronutrientes (como o nitrogênio, fósforo, potássio, entre outros), é recomendada sua aplicação como fertilizante e/ou condicionador de solo.

Do ponto de vista de proteção ambiental, a disposição dos biossólidos para recuperação de áreas degradadas e a reciclagem agrícola são as aplicações mais indicadas para o lodo, tendo em vista a viabilidade da reciclagem dos nutrientes e a promoção de melhorias físicas na estruturação do solo (Godoy, 2013; Santos, 2001).

O uso do esgoto como fertilizante, mostra ser uma boa alternativa para o agricultor em termos econômicos, seja do ponto de vista financeiro como de produtividade, sendo também positivo para o meio ambiente (Lira, 2006). Fia, Matos e Aguirre (2005), consideram uma opção viável, pois além de aumentar a produtividade, melhora a capacidade de retenção de água pelo solo e a capacidade de troca catiônica.

Carballa et al. (2009) e Moerman et al. (2009), analisaram os benefícios da recuperação de fósforo de efluentes anaeróbicos industriais por estruvita para aplicação como fertilizante. Os autores mencionam que, dependendo das concentrações iniciais de fosfato nas águas residuais e dos níveis de amônia e magnésio, a estratégia escolhida para a cristalização da estruvita é um fator determinante para alcançar uma tecnologia econômica.

Uysal et al. (2014), avaliaram o valor agrônômico da estruvita. Os estudos mostraram que a estruvita pode ser tão eficaz quanto o superfosfato comercial e, em algumas circunstâncias pode superá-lo. Uysal, Yilmazel e Demirer (2010), sugeriram que a eficácia da estruvita como fertilizante é favorecida em solos com pH ácido.

A remoção de nutrientes da urina, realizada por biocarvão modificado com óxido de Mg foi bem-sucedida. O material resultante, enriquecido com nutrientes (amônio e fosfato), apresentou alto desempenho em comparação com fertilizantes comerciais (Xu et al., 2018). Na mesma linha, Sun et al. (2018), investigaram a possibilidade de reposição de P usando biocarvão enriquecido com P, como corretivo do solo, deixando algumas considerações para novos estudos.

Kizito et al. (2019), utilizaram biocarvão enriquecido com nutrientes (do digerido anaeróbico) como corretivo do solo durante o crescimento do milho. Eles mencionam que efeitos positivos nos micronutrientes, macronutrientes, matéria orgânica e rendimento de biomassa do solo indicam que o biocarvão enriquecido poderia substituir

parcialmente os fertilizantes químicos e promover a agricultura orgânica por meio do conceito de economia circular.

Em outra pesquisa, estudaram a curva de incubação do lodo de esgoto doméstico com cal hidratada, usada com a finalidade de promover a sua higienização, e observar os efeitos de diferentes doses de lodo caleado sobre características químicas do solo. Como resultado, o solo teve sua fertilidade aumentada com a adição do lodo caleado. No entanto, os autores observaram alteração no pH do solo e o aumento na concentração de sódio trocável, e então recomendaram a sua utilização como corretivo de acidez do solo e não como adubo orgânico (Fia, Matos e Aguirre, 2005).

2.15. PROCESSOS DE ADSORÇÃO E USO DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO

O risco de escassez de abastecimento de rocha fosfática (que é utilizada para a produção de fertilizantes) e a necessidade de controlar a eutrofização dos corpos d'água são motivos válidos para a busca de técnicas de tratamento capazes de sequestrar e recuperar P dos efluentes.

As técnicas atuais podem recuperar fosfato de meios aquosos altamente carregados, mas é cada vez mais importante desenvolver soluções economicamente atraentes para efluentes de baixa concentração. A técnica de adsorção pode ser altamente seletiva e eficiente para a adsorção e recuperação de fosfato de água e efluentes, que podem atuar como fontes secundárias de fósforo (Bacelo et al., 2020).

Castellan (1987); Maron e Prutton (1977) definem adsorção como um processo pelo qual uma substância é concentrada na superfície de outra fase sólida ou líquida. Portanto é considerado um fenômeno superficial. A substância que se concentra na superfície é chamada de adsorbato e a fase que o retém é chamada de adsorvente. O processo de adsorção é considerado bastante simples, eficiente, ecológico e economicamente viável (An et al., 2021; Feng et al., 2022; Ma et al., 2011).

Distinguem-se três tipos de adsorção, dependendo da atração entre o adsorbato e o adsorvente, seja de natureza física, química ou de troca iônica. Se a interação envolve forças de van der Waals e eletrostáticas, é chamada de adsorção física ou fisissorção. A adsorção física é um fenômeno reversível onde as moléculas não são adsorvidas em um local específico e permanecem na superfície do sólido (Leyva-Ramos, 2007). Caso o adsorbato sofra uma interação química com o adsorvente, o fenômeno é denominado adsorção química, adsorção ativa ou quimissorção (Cruz-Olivares et al., 2011). A adsorção que ocorre por troca iônica é frequentemente chamada de adsorção por troca (Leyva-Ramos,

2007), o processo ocorre entre os íons mantidos na superfície. O mesmo autor menciona que os estudos de adsorção são realizados em sua maioria em escala descontínua (em lotes) e são avaliados diferentes parâmetros (concentração inicial de adsorbato, temperatura, dose de adsorvente, tamanho de partícula, pH da solução, interferências) que afetam esse processo.

Até agora, vários adsorventes têm sido usados para remover e reciclar fosfatos de águas residuais, como óxidos/hidróxidos metálicos (Xiang et al., 2019; Yu et al., 2019), minerais (Wei et al., 2018), sílica porosa (Huang et al., 2014), zeólita (Li et al., 2020; Mitrogiannis et al., 2018), materiais a base de polímeros (Yang et al., 2019) e materiais derivados de biomassa (Hu et al., 2020; Liao et al., 2018; Wang et al., 2016; Zhang et al., 2016). Embora os óxidos/hidróxidos metálicos apresentem alta capacidade de adsorção de fosfato, a separação e reciclagem deles da solução é difícil, limitando a aplicação em grande escala (Liu et al., 2015; Zhang et al., 2019).

Por sua parte Boeykens et al. (2017), demonstraram que o calcário dolomítico é um adsorvente eficiente de fosfato de soluções aquosas contendo outros contaminantes. O calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) existe amplamente em rochas sedimentares, também é encontrada em algumas rochas ígneas (Jacquemyn et al., 2015) e metamórficas (Lloyd, Eiler e Nabelek, 2017). Este adsorvente natural é amplamente aplicado na construção, produção de vidro, fabricação de cimento, indústrias de borracha, produção de fertilizantes na agricultura, remoção de amônia de gases e também pode ser empregado para remoção de metais pesados de águas residuais (Tsirambides, 2001; Hewlett e Liska, 2019; Acharya, 2018; Diwan et al., 2020).

Continuando com a pesquisa de Boeykens et al. (2017), Piol et al. (2019), estudaram o processo de dessorção de fosfato para a recuperação e reutilização do calcário dolomítico como adsorvente no tratamento de água, avaliando as possibilidades de disposição final do calcário dolomítico saturado para melhorar o solo agrícola ao aplicar o fosfato dessorvido como fertilizante. O agente mais eficiente para o processo de dessorção foi NH_4Cl 1 mol L^{-1} , e foram obtidos até quatro ciclos eficientes de adsorção-dessorção. A biodisponibilidade de fosfato do calcário dolomítico saturado foi avaliado com microrganismos autóctones. Os extratos obtidos foram utilizados em experimentos de crescimento de *Lactuca sativa* (alface), sem efeitos de fitotoxicidade e promoção do crescimento vegetal.

Conforme Bacelo et al. (2020), alguns materiais, especificamente os de origem biológica e os baseados em metais não tóxicos como o cálcio, o magnésio ou o ferro,

podem ser utilizados diretamente como fertilizantes após a saturação com fosfato.

O descrito anteriormente abre a possibilidade de realizar novos estudos envolvendo a reutilização de calcário dolomítico saturado com nutrientes que podem participar no desenvolvimento das plantas.

2.16. CARACTERIZAÇÃO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO

O conhecimento das características físico-químicas do material adsorvente é essencial para entender e explicar sua interação com o adsorbato. Assim, diferentes técnicas instrumentais serão utilizadas para permitir sua caracterização, como Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raios X (DRX) e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

2.16.1. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) tem sua aplicação mais imediata na análise qualitativa (Piqué e Vázquez, 2012): detecção de grupos funcionais presentes no material.

Esta espectroscopia baseia-se na absorção da radiação infravermelha por moléculas vibrantes. A porção infravermelha do espectro eletromagnético é dividida em três regiões: o infravermelho próximo, médio e distante, nomeados por sua relação com o espectro visível. O infravermelho distante (aproximadamente $400-10\text{ cm}^{-1}$) é adjacente à região de micro-ondas, possui baixa energia e pode ser utilizado em espectroscopia rotacional, essa zona é chamada de zona de impressão digital (flexão de CH, CO, NC, CC, etc); o infravermelho médio (aproximadamente $4000-400\text{ cm}^{-1}$) pode ser usado para estudar as vibrações fundamentais e a estrutura vibracional rotacional decorrentes de grupos contendo hidrogênio ou grupos com ligações duplas ou triplas isoladas, enquanto o infravermelho próximo ($14000-4000\text{ cm}^{-1}$) pode excitar sobretons ou vibrações harmônicas (Skoog, Holler e Nieman, 1998). Uma molécula absorverá a energia de um feixe de luz infravermelha quando a referida energia incidente for igual à necessária para que ocorra uma transição vibracional da molécula. Ou seja, a molécula começa a vibrar de uma certa maneira graças à energia fornecida a ela pela luz infravermelha. Duas categorias básicas de vibrações podem ser distinguidas: tensão e flexão.

Cada molécula apresenta um espectro infravermelho característico (como uma impressão digital), pois todas as moléculas (exceto espécies diatômicas homonucleares como O_2 e Br_2) possuem algumas vibrações que, quando ativadas, causam a absorção de um

determinado comprimento de onda na zona do espectro eletromagnético do infravermelho. Desta forma, analisando quais são os comprimentos de onda que uma substância absorve na zona do infravermelho, pode-se obter informações sobre os grupos funcionais que a compõem (Rabek, 1980). Conforme Ji et al. (2009), FTIR é um método rápido e relativamente econômico para identificar e quantificar o calcário dolomítico.

2.16.2. Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios-X (DRX) reporta o fenômeno de interação entre o feixe de raios-X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionado ao espalhamento coerente. A técnica baseia-se na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado. O feixe difratado é expresso através de picos que se destacam do background (ou linha de base), registrados num espectro de intensidade versus o ângulo 2θ (ou d), constituindo o padrão difratométrico ou difratograma (Cullity, 1978).

Segundo Cavalcanti et al. (2016), a técnica de difração de raios X (DRX) tem sido amplamente utilizada para a determinação de fases cristalinas em rochas, portanto, o método permite caracterizar um ou mais minerais presentes na rocha. A caracterização mineralógica expõe quais minerais estão presentes na amostra, feita por meio da comparação de seus difratogramas com padrões de referência, disponíveis em bancos de dados de DRX.

2.16.3. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Por meio da incidência de um feixe de elétrons na amostra, sob condições de vácuo, é formada a imagem eletrônica de varredura. A incidência do feixe promove a emissão de elétrons secundários, retroespalhados e absorvidos, assim como de raios X característicos e de catodoluminescência (Reed, 1996). A imagem eletrônica de varredura representa em tons de cinza o mapeamento e a contagem de elétrons secundários e retroespalhados emitidos pelo material analisado. Esta técnica é utilizada em várias áreas do conhecimento, incluindo a mineralogia.

Conforme Duarte et al. (2003), o sistema de EDS (Energy Dispersive System) pode ser acoplado ao MEV, o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras, a partir da emissão de raio X característicos.

3. OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL: Avaliar o reuso do calcário dolomítico saturado com nutrientes adsorvidos do efluente hidropônico, como corretivo e fertilizante em solos agrícolas e seu impacto no desempenho agrônômico do feijão.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Estimar a porcentagem de remoção dos nutrientes do efluente proveniente do sistema hidropônico através da adsorção com uso de calcário dolomítico;
- Caracterizar o calcário dolomítico utilizado como adsorvente (antes e depois da saturação com nutrientes);
- Identificar as propriedades físico-químicas do solo antes do tratamento;
- Comparar as propriedades do solo após corrigir com calcário dolomítico saturado com nutrientes, confrontadas ao solo tratado com o calcário dolomítico in natura e com calcário dolomítico granulado durante o tempo de incubação (30, 60 e 90 dias);
- Determinar o desempenho agrônômico do feijão por tratamento;
- Determinar a concentração de nutrientes nos grãos do feijão por tratamento;
- Determinar as propriedades químicas do solo após a colheita do feijão.

4. METODOLOGIA

4.1. TIPO DE ESTUDO

Trata-se de um estudo experimental sobre o reaproveitamento do calcário dolomítico saturado com nutrientes a partir do tratamento de efluentes hidropônicos, como corretivo e fertilizante de solos agrícolas e seu impacto no desempenho agrônomo do feijão.

4.2. LOCAL DE ESTUDO

Os ensaios para estimar a porcentagem de remoção dos nutrientes do efluente proveniente do sistema hidropônico foram realizados no Laboratório de Águas da Faculdade de Engenharia Agrônoma da Universidade Nacional do Leste (Paraguai). As análises das amostras de solo e grãos de feijão foram realizadas no Laboratório de Solos e Tecido Foliar da mesma faculdade.

O calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado foram caracterizados por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Todas essas análises foram realizadas nos laboratórios da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), instalados no Parque Tecnológico Itaipu (PTI). A avaliação da qualidade das amostras foi realizada no Laboratório de Análises Agrônomo "AGRONÓMICO" (Paraguai).

4.3. PROCEDIMENTOS

4.3.1. Saturação do Calcário Dolomítico

O procedimento para concentrar os nutrientes no calcário dolomítico foi realizado como descrito abaixo.

Inicialmente, o efluente hidropônico foi analisado para a identificação dos nutrientes presentes na amostra e quantificação da concentração de tais nutrientes. As amostras de efluentes foram coletadas de um sistema hidropônico, utilizado na produção de alface. As análises foram realizadas, de acordo com os métodos padrão para análise de água e efluentes (APHA, AWWA e WEF, 2017). A determinação do fósforo foi realizada pelo 4500-P E - Método do ácido ascórbico. Enquanto, os demais nutrientes (Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn e B) foram determinados pelo método espectrométrico de absorção atômica. 3111 B - Método direto de chama de ar-acetileno. O pH foi determinado pelo método eletrométrico

4500-H⁺ B.

Para avaliar o comportamento da adsorção dos nutrientes sobre calcário dolomítico, foram realizados ensaios em reatores por lote ou descontínuos, em triplicata, onde 3 g do adsorvente (tamanho de partícula 53-500µm) e 50 mL de amostra do efluente do sistema hidropônico foram adicionados em um recipiente plástico, na proporção de calcário dolomítico/solução utilizado por Boeykens et al. (2017). Esta mistura permaneceu em contato por 24 horas com agitação (160 rpm) para permitir adsorção suficiente de nutrientes no calcário dolomítico. Após, a mistura foi filtrada e a solução resultante analisada para determinar quais os nutrientes, e em que proporção, ficaram retidos na superfície do adsorvente. Essa avaliação foi realizada por comparação da composição da solução resultante com a solução adicionada inicialmente.

As porcentagens de remoção de nutrientes foram calculadas de acordo com a equação 4 (Ramírez, Martínez e Fernández, 2013):

$$\text{Remoção (\%)} = 100 \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

C_0 e C_e são as concentrações inicial e de equilíbrio (mg/L), respectivamente.

O calcário dolomítico foi obtido em uma loja local (Paraguai). Ele é comercializado em pó, já triturado. Passou pelo processo de peneiramento. Para isso, foram utilizadas peneiras U.S.A Standard Testing Sieve, A.S.T.M.E-11 Specification, 50 e 270 Mesh.

4.3.2. Caracterização do Calcário Dolomítico

Uma vez saturado o adsorvente, foi realizada a caracterização dos materiais (calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado), para verificar sua composição. Os grupos funcionais foram determinados por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). A identificação das fases constituintes foi realizada por Difração de Raios X (DRX) e a obtenção de informações morfológicas foi feita através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). A técnica de EDS acoplada ao equipamento de MEV foi utilizada para avaliação qualitativa da composição das amostras.

Os testes por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foram realizados no equipamento FRONTIER MIR+SP10 STD - Perkim

Elmer, utilizando pastilhas de KBr. Para cada espectro foram realizadas 32 varreduras com a resolução de 4 cm^{-1} , na região de 4000 a 400 cm^{-1} .

As análises por Difração de Raios X (DRX) foram realizadas em difratômetro multipropósito EMPYREN - PANalytical. A configuração do equipamento foi: monocromador com fendas (1, 1, 0, 3), operando a 40 kV e uma corrente de 20 mA. A velocidade de varredura utilizada foi de $1^\circ/\text{min}$, ângulo 2θ variando de 5 a 60° e radiação Cu - $K\alpha$, com comprimento de onda de $0,15418 \text{ nm}$. Os dados obtidos em laboratório foram analisados por meio do programa X'Pert HighScore Plus® - PANalytical®, onde foi realizada a identificação de fases cristalinas das amostras. O programa identifica a amostra comparando-a com os padrões de referência.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no equipamento Zeiss EVO-MA10 com auxílio da Evaporadora para deposição de ouro/paládio sobre as amostras. As imagens foram feitas na faixa de proporção $1 - 100 \mu\text{m}$.

Também foi avaliada a qualidade das amostras: teor de cálcio e magnésio, poder de neutralização (PN), reatividade (RE), poder relativo de neutralização total (PRNT). As análises de calcário dolomítico in natura e saturado foram realizados no Laboratório de Análises Agrônomico "AGRONÓMICO" (Paraguai), conforme o manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos do Brasil (2014), Cap. V. (B) Análise Granulométrica. (C) Item 3 e 4.3 para MgO e CaO, respectivamente (AAS).

4.3.3. Amostragem e Análise do Solo

Foi realizada a análise de dois tipos de solos que foram utilizados para estudar a disponibilidade de nutrientes adsorvidos pelo calcário dolomítico saturado, a fim de corrigi-los e adubá-los. Os solos foram coletados da camada de $0-20 \text{ cm}$ de profundidade de terras agrícolas de duas localidades do Paraguai. A amostra de solo de textura argilosa foi extraída do Distrito de Minga Guazú: Latitude $25^\circ 29' 23.7''\text{S}$ e Longitude $54^\circ 51' 23.0''\text{W}$ (Departamento de Alto Paraná) e a de textura arenosa do Distrito de Yhú: Latitude $25^\circ 08' 39.4''\text{S}$ e Longitude $55^\circ 51' 49.4''\text{W}$ (Departamento de Caaguazú), totalizando 45 kg cada. O solo em Minga Guazú é da ordem dos Latossolos, caracterizado com textura argilosa, classificado como Rhodic Kandiudox, da família da argila muito fina. Nos Latossolos, as argilas predominantes são os óxidos hidratados de ferro (Fe) e alumínio (Al) e a caulinita, que transferem para o solo baixa capacidade de troca catiônica, ou seja, pouca capacidade de reter os elementos nutrientes que as plantas precisam, como o potássio (K),

cálcio (Ca), magnésio (Mg) e outros micronutrientes catiônicos trocáveis como cobre, zinco, manganês e ferro. Kandiudox de caráter róxico, o que significa que tem horizonte argílico vermelho. O tipo de solo de Yhú corresponde ao Argissolo, especificamente ao subgrupo arenoso Arenic Paleudalf. Argissolo vem do antigo nome de Pedalferos que era dado aos solos ricos em alumínio (Al) e ferro (Fe). O arenoso Arenic Paleudalf corresponde àqueles solos em que o argílico aparece mais profundo, cerca de 100 cm de profundidade no solo (López et al., 1995).

Posteriormente, cada tipo de solo foi misturado até obter uma distribuição homogênea. As amostras foram secas, moídas e peneiradas em malhas de 2 mm e submetidas a análises físico-químicas para obtenção dos dados prévios aos tratamentos a serem aplicados.

Foram analisadas diversas propriedades físico-químicas: textura do solo, CTC, matéria orgânica, carbono, pH, fósforo, cátions trocáveis (Ca, K, Mg e Al), seguindo a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (Da Silva, 2009): pH em H₂O, Al, Ca e Mg trocáveis extraídos com KCl 1 M, K trocável e Fe extraídos com solução Mehlich 1, quantificando os cátions por Espectrofotometria de Absorção Atômica, capacidade de troca catiônica, obtida pela soma dos diferentes cátions básicos trocáveis e ácidos presentes no solo, C e M.O foram determinados seguindo metodologia proposta por Walkley e Black, fósforo disponível extraído com solução Mehlich 1; textura de solo pelo método do hidrômetro (Bouyoucos) para determinação da distribuição granulométrica de partículas de areia, limo e argila.

4.3.4. Tratamento do Solo e Desempenho Agronômico do Feijão

O reuso do calcário dolomítico saturado como corretivo e fertilizante de solos agrícolas foi avaliado por tratamentos, utilizando um delineamento experimental completamente casualizado para organizar os padrões de correção e desempenho agronômico para os diferentes tratamentos. Os tratamentos aplicados para cada tipo de solo são detalhados no Quadro 9.

Quadro 9. Tratamentos aplicados.

Tratamento	Solo argiloso
T1(Controle)	Solo argiloso sem calcário dolomítico.
T2 (DN)	Solo argiloso com calcário dolomítico in natura.
T3 (DS)	Solo argiloso + calcário dolomítico saturado com nutrientes do efluente hidropônico.
T4 (DG)	Solo argiloso + calcário dolomítico granulado.
Tratamento	Solo arenoso
T1(Controle)	Solo arenoso sem calcário dolomítico.
T2 (DN)	Solo arenoso com calcário dolomítico in natura.
T3 (DS)	Solo arenoso + calcário dolomítico saturado com nutrientes do efluente hidropônico.
T4 (DG)	Solo arenoso + calcário dolomítico granulado.

Fonte: Elaboração própria (2022).

Cada tratamento, incluindo a testemunha, foi replicado cinco vezes, resultando num total de 20 unidades experimentais aplicadas em cada tipo de solo, as quais foram colocadas sob meia sombra branca 50%. As unidades experimentais foram instaladas na Faculdade de Engenharia Agrônômica da Universidade Nacional do Leste (Paraguai): Latitude 25°49'59.8"S e Longitude 54°77'15.8"W. O croqui contendo a disposição dos vasos com os diferentes tratamentos encontra-se no APÊNDICE - Desenho 1.

O calcário dolomítico granulado foi utilizado para fazer a comparação em termos de eficiência entre as formas de apresentação do corretivo. As especificações do calcário dolomítico granulado são encontradas no Anexo 1.

As doses de calcário aplicadas foram calculadas considerando os resultados da análise do solo, realizada em avaliação anterior ao ensaio e levando em consideração as diferenças de classe textural. A massa de um hectare foi calculada para cada tipo de solo. Em termos gerais, estima-se que a camada de solo de um hectare com espessura de 20 cm tenha uma massa aproximada de 2.000.000 kg (Quintero, 1993). Com isso, foi possível calcular a quantidade de calcário para 2.000 gramas de solo, pelo método da saturação por bases, aplicando a equação 3 e considerando que a porcentagem de saturação por bases necessária para o cultivo do feijão é 70% (Lopes, Silva e Guilherme, 1991) e CTC efetiva.

Uma vez calculada a quantidade de calcário a ser aplicado em cada vaso (2.747 kg/ha de calcário para o solo arenoso e 2.122 kg/ha de calcário para o solo argiloso), as 2.000 gramas de cada tipo de solo foram pesados, adicionando 2,75 g de calcário para o solo arenoso e 2,12 g de calcário para o solo argiloso, respectivamente; que foram misturados em um recipiente de plástico para obter uma distribuição homogênea no solo. Logo após, colocados nos vasos (saco de polietileno).

Posteriormente, em cada saco de polietileno (25 cm x 20 cm) contendo cada tratamento e devidamente etiquetadas, foi adicionada água destilada (devido a presença de cálcio na água) suficiente para manter a umidade do solo, a fim de facilitar a reação do calcário no solo; mantendo esta condição durante toda a fase experimental, tapando a abertura do saco de polietileno para evitar perda de água por evaporação. Além disso, o controle da umidade foi monitorado duas vezes por semana, usando um medidor portátil. A instalação das unidades experimentais foi realizada em 05 de novembro de 2022.

Uma vez aplicados os tratamentos com os diferentes calcários, foram feitas extrações de 25 g de solo como amostras dos diferentes vasos, durante cada período de avaliação/incubação (30, 60 e 90 dias). As amostras de solo foram extraídas dos vasos por meio de um coletor preparado para esse fim. Consiste em um tubo de PVC de diâmetro 6 cm e longitude de 30 cm, com abertura vertical de 15 cm (APÊNDICE - Fotografia 1) para facilitar a extração do solo e transferência ao saco plástico com fecho ziplock, para serem encaminhadas ao laboratório. Uma vez no laboratório, eles foram secos, moídos e peneirados para análises posteriores, que incluíram: pH, alumínio, cálcio e magnésio trocáveis e fósforo disponível. As datas de coleta de amostras de solo foram: 05 de dezembro de 2022, 04 de janeiro de 2023 e 03 de fevereiro de 2023, considerando 30, 60 e 90 dias de incubação, respectivamente.

Uma vez corrigido o solo, procedeu-se à fertilização com base nos resultados da análise do solo, realizada na avaliação anterior ao ensaio e levando em consideração as diferenças de classe textural e a recomendação correspondente, de acordo com a planta a cultivar: argiloso (N:20; P:105; K:30 kg/ha) e arenoso (N:20; P:105; K:80 kg/ha). No desbaste, aplicou-se 40 kg/ha de N em cada vaso. Finalmente, na etapa de floração, foi repetida a dose aplicada no pré-plantio. O Quadro 10 mostra as diferentes doses de fertilizante (g/vaso) usadas para cada tipo de solo, e as respectivas etapas aplicadas.

Quadro 10. Doses de fertilizante aplicados para cada tipo de solo e em diferentes etapas.

Solo	Fertilizante	Doses	Etapa (Data)
Argiloso	Ureia (45% de N)	0,045 g/vaso	Pré plantio (18/02/2023)
	Ureia (45% de N)	0,089 g/vaso	Desbaste (12/04/2023)
	Ureia (45% de N)	0,045g/vaso	Floração (28/04/2023)
	P ₂ O ₅ (46% de P)	0,230 g/vaso	Pré plantio (18/02/2023)
	P ₂ O ₅ (46% de P)	0,230 g/vaso	Floração (28/04/2023)
	KCl (60% de K)	0,045 g/vaso	Pré plantio (18/02/2023)
	KCl (60% de K)	0,045 g/vaso	Floração (28/04/2023)
Arenoso	Ureia (45% de N)	0,045 g/vaso	Pré plantio (18/02/2023)
	Ureia (45% de N)	0,089 g/vaso	Desbaste (12/04/2023)
	Ureia (45% de N)	0,045g/vaso	Floração (28/04/2023)

	P ₂ O ₅ (46% de P)	0,230 g/vaso	Pré plantio (18/02/2023)
	P ₂ O ₅ (46% de P)	0,230 g/vaso	Floração (28/04/2023)
	KCl (60% de K)	0,134 g/vaso	Pré plantio (18/02/2023)
	KCl (60% de K)	0,134 g/vaso	Floração (28/04/2023)

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a correção e fertilização do solo, foi realizada a semeadura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) a fim de verificar a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Além disso, foi caracterizado o tecido vegetal para conferir a absorção de nutrientes pelo grão de feijão. A variedade plantada foi a Habilla 40; é uma variedade local (Paraguai), com bom desempenho. No Brasil, a variedade é conhecida como feijão rajado. A planta é ereta, com altura de 35 a 37 centímetros com flores roxas, o número médio de vagens por planta é de 6 e o comprimento é de 9 centímetros. O ciclo vegetativo é de 95 dias e a semente apresenta coloração creme mosqueada (Casaccia, 1991).

Antes da semeadura, as sementes foram tratadas com fungicida, para prevenir o ataque de microrganismos do solo. Para isso, 200 g de semente foram pesadas e contatado com 0,4 g de fungicida.

A semeadura do feijão foi realizada no dia 20 de março de 2023, depositando 4 sementes no mesmo buraco, na profundidade de 1 cm, a fim de obter uma ótima germinação. Com uma semana, a maioria das sementes já havia germinado.

Conforme pode ser observado no Quadro 10, o desbaste foi realizado no dia 12 de abril de 2023, deixando 2 plantas por vaso. As plantas que foram desbastadas foram reincorporadas ao solo.

Em relação à umidade do solo, para se obter uma boa produtividade na maioria das lavouras, tem-se indicado mantê-la próxima à capacidade de campo. No caso do feijão, estudos indicam que para o desenvolvimento da cultura a umidade residual no campo deve estar entre 40 e 60%, em todas as fases (Siqueira e Palacios, 1985). Por isso, no experimento o solo foi irrigado, manual e diariamente, com 100 mL de água por vaso.

Para o controle de pragas e doenças, foram utilizados produtos recomendados de acordo com suas necessidades e incidência. Entre as pragas que apareceram desde a germinação até a floração, estão: mosca branca, vaquinha, cigarrinha, percevejos e tripses. Para o controle dessas pragas foi utilizado um inseticida de amplo espectro da família dos neonicotinóides, cuja composição é de 75 g Thiamethoxam. Na fase de floração, começaram a atacar as lagartas, incidindo principalmente nas folhas e vagens. Para o controle foi utilizado um inseticida, cuja composição é Emamectin Benzoato 30.

A doença causada pelo fungo cercospora foi tratada com um fungicida foliar de ação sistêmica e mesostêmica, composto pelos princípios ativos Trifloxystrobin e Prothioconazole.

A colheita do feijão começou no dia 07 de junho de 2023, data na qual algumas vagens já estavam secas. Este processo foi concluído no dia 26 de junho com a colheita total das plantas. Os parâmetros de desempenho agrônômico avaliados foram: número de vagens, comprimento de vagens (cm), número de grãos por vagem e peso de 100 grãos (g).

Após a colheita da planta, o solo dos vasos foi seco para análise de: pH (em água), alumínio, cálcio e magnésio trocáveis e fósforo disponível, a fim de avaliar o comportamento dessas propriedades 130 dias após a primeira adubação química e depois do cultivo do feijão, de acordo com os tratamentos aplicados.

4.3.5. Análise do Grão de Feijão

Os grãos de feijão foram colhidos para avaliar a quantidade de nutrientes absorvidos pela planta. Foram analisados os parâmetros de cálcio, magnésio, nitrogênio, fósforo e potássio, seguindo a metodologia do EMBRAPA (Da Silva, 2009).

4.4. ANÁLISE DOS DADOS

Os dados obtidos com relação a porcentagem de remoção de nutrientes do efluente hidropônico foram submetidos à estatística descritiva (médias e desvio padrão).

A normalidade dos dados foi medida por meio do Teste Shapiro-Wilk. Os resultados do período de incubação foram avaliados por meio da análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$) no software InfoStat. Além disso, foi realizado o teste de interação entre tratamentos e períodos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. SATURAÇÃO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO

Na Tabela 1, são apresentadas as concentrações dos nutrientes determinados na amostra analisada. O pH da amostra também foi determinado, obtendo-se como resultado o valor 8,01. O efluente hidropônico foi obtido de um sistema de produção de alface, onde esteve 2 meses em contato com a planta.

Tabela 1. Concentração de nutrientes determinados na amostra do efluente hidropônico.

Nutriente	Concentração (mg/L)
Fósforo (P)	2,67
Cálcio (Ca)	100,50
Magnésio (Mg)	30,00
Sódio (Na)	4,52
Ferro (Fe)	4,24
Zinco (Zn)	0,48
Manganês (Mn)	0,12
Boro (B)	0,79

Fonte: Elaboração própria (2022).

Na Tabela 2, são apresentados a média e o desvio padrão para a concentração final dos nutrientes após estarem em contato com o calcário dolomítico, bem como a porcentagem de remoção de nutrientes obtidos nos ensaios.

Tabela 2. Concentração final e porcentagem de remoção de nutrientes.

Nutriente	Concentração inicial (mg/L)	Concentração final (mg/L)	Remoção (%)	Desvio padrão
Fósforo (P)	2,67	0,68	74,53	0,05
Cálcio (Ca)	100,50	80,65	19,75	1,80
Magnésio (Mg)	30,00	30,00	-	-
Sódio (Na)	4,52	4,52	-	-
Ferro (Fe)	4,24	4,24	-	-
Zinco (Zn)	0,48	0,42	12,50	1,08
Manganês (Mn)	0,05	0,02	60,00	3,31
Boro (B)	0,79	0,79	-	-

Fonte: Elaboração própria (2022).

Como visto na Tabela 2, o calcário dolomítico retém fósforo, manganês, cálcio e zinco, respectivamente; destacando que são macro e micronutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas. Com o resultado obtido para o fósforo, foi possível reproduzir o que foi obtido por Boeykens et al. (2017), que conseguiram remover o fósforo em aproximadamente 74%. Além disso, o calcário dolomítico consegue adsorver cálcio, um dos principais componentes de materiais corretivos de acidez de solo.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO

5.2.1. Grupos Funcionais por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

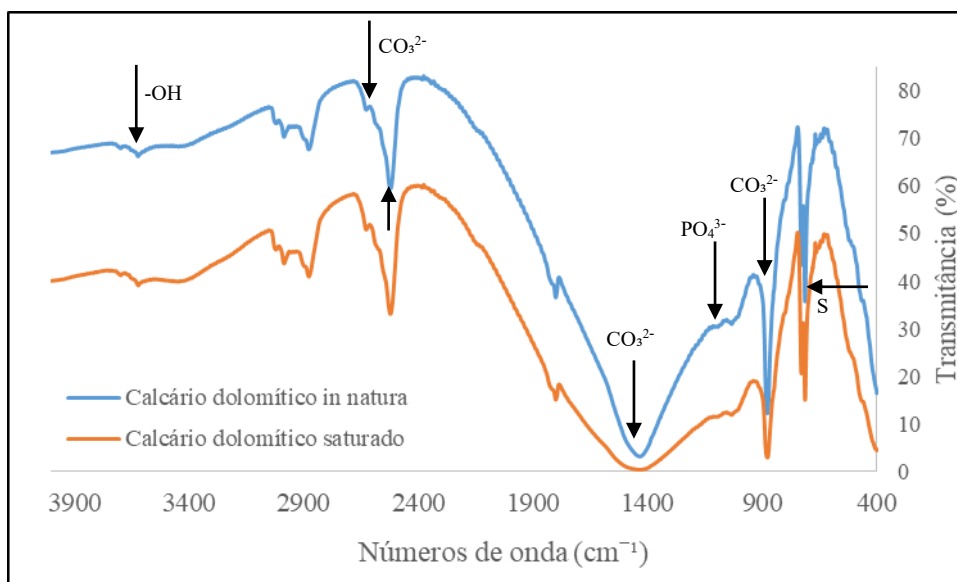
Na Figura 2, são apresentados os espectros FTIR obtidos do calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado (com nutrientes). No espectro FTIR do calcário dolomítico in natura, antes de passar pelo processo de adsorção de nutrientes, observam-se as principais bandas que aparecem em torno de 1450 e 878 cm^{-1} , que indicam a presença do grupo CO_3^{2-} . Khoshraftar, Masoumi e Ghaemi (2023) observaram picos atribuídos ao grupo carbonato em 1438 e 881 cm^{-1} . Segundo a Direção Geral de Desenvolvimento Mineiro (2013), o calcário dolomítico tem enxofre entre seus componentes; portanto, o pico que aparece em 713 cm^{-1} pode ser atribuído a impurezas de enxofre na amostra. O pico em 2520 cm^{-1} pode ser atribuído a impurezas na amostra (Gallucci et al., 2007), considerando que às vezes pequenas quantidades de ferro e manganês também podem estar presentes no calcário dolomítico (Walker et al., 2003).

Autores como Lavat e Graselli (2015), relatam a presença de bandas em 3400, 1630 e 1575 cm^{-1} , atribuídas às vibrações da ligação O-H da água, ausentes nas amostras analisadas. Os mesmos autores também mencionam que a presença de CH devido à absorção típica em 3643 cm^{-1} é característica da vibração Ca-OH. Da mesma forma, Nústez-Castaño, Villamizar-Castro e Vargas-Solano (2019), detectaram a presença do grupo funcional hidroxila nas bandas entre 3643 e 3645 cm^{-1} , pertencentes às vibrações do grupo -OH do hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, como consequência da interação entre os óxidos e a umidade do ambiente. Neste estudo, uma banda característica foi encontrada em 3622 cm^{-1} . As bandas presentes entre 1400 e 1421 cm^{-1} representam o estiramento e as vibrações das ligações do complexo aniônico CO_3^{2-} na superfície do óxido misto (White, 1974).

O calcário dolomítico mostra absorções FTIR características em 3020, 2626 e 730 cm^{-1} , indicando a presença de carbonatos (Ji et al., 2009); o calcário dolomítico utilizado neste estudo apresentou absorção na banda de 2627 cm^{-1} , o que novamente confirma a presença de carbonatos no adsorvente. A presença do grupo carbonato também é atribuída às bandas 2879 e 1800 cm^{-1} .

A banda de 1030 cm^{-1} está relacionada ao alongamento do grupo PO_4^{3-} (Ramakrishnan, Nayar e Aruldhas, 1986).

Figura 2. Espectro FTIR do calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado.



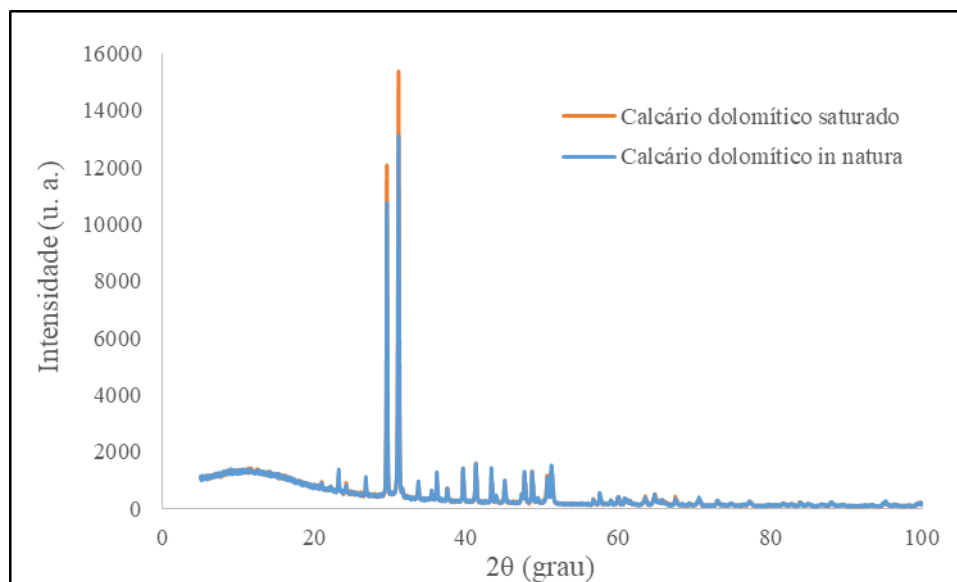
Fonte: Elaboração própria (2022).

Após a adsorção dos nutrientes, observou-se alongamento entre 1400 e 1421 cm^{-1} , devido ao aumento de teores de CaO. A banda que estava em 1030 cm^{-1} (correspondente ao grupo fosfato) mudou para 1000 cm^{-1} o que pode ser atribuído à inserção de um dos nutrientes na superfície do calcário dolomítico ou à reação química dos componentes do calcário dolomítico com um dos nutrientes, uma vez que as absorções detectadas em 1000-750 cm^{-1} pertencem aos modos de vibração dos octaedros de MgO_6 presentes no calcário dolomítico (Lavati e Graselli, 2015).

5.2.2. Identificação dos Componentes por Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 3, é apresentada a comparação entre os perfis de DRX antes e depois da adsorção de nutrientes. Pode-se observar que não há diferenças entre os espectros quanto ao aparecimento de novos picos que possam indicar a presença de novos compostos no difratograma do calcário dolomítico saturado. A diferença que pôde ser verificada tem a ver com a intensidade dos picos encontrados no difratograma do calcário dolomítico saturado, pois neste espectro aparecem os mesmos picos encontrados no difratograma do calcário dolomítico in natura, mas com maior intensidade, confirmando o aumento dos grupos carbonato, através da adsorção de cálcio do efluente hidropônico. Khoshraftar, Masoumi e Ghaemi (2023); Mangwandi et al. (2014), indicam que a calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) são os principais minerais do calcário dolomítico in natura devido às suas altas intensidades de pico.

Figura 3. Comparação entre os perfis de DRX antes e depois da adsorção de nutrientes.



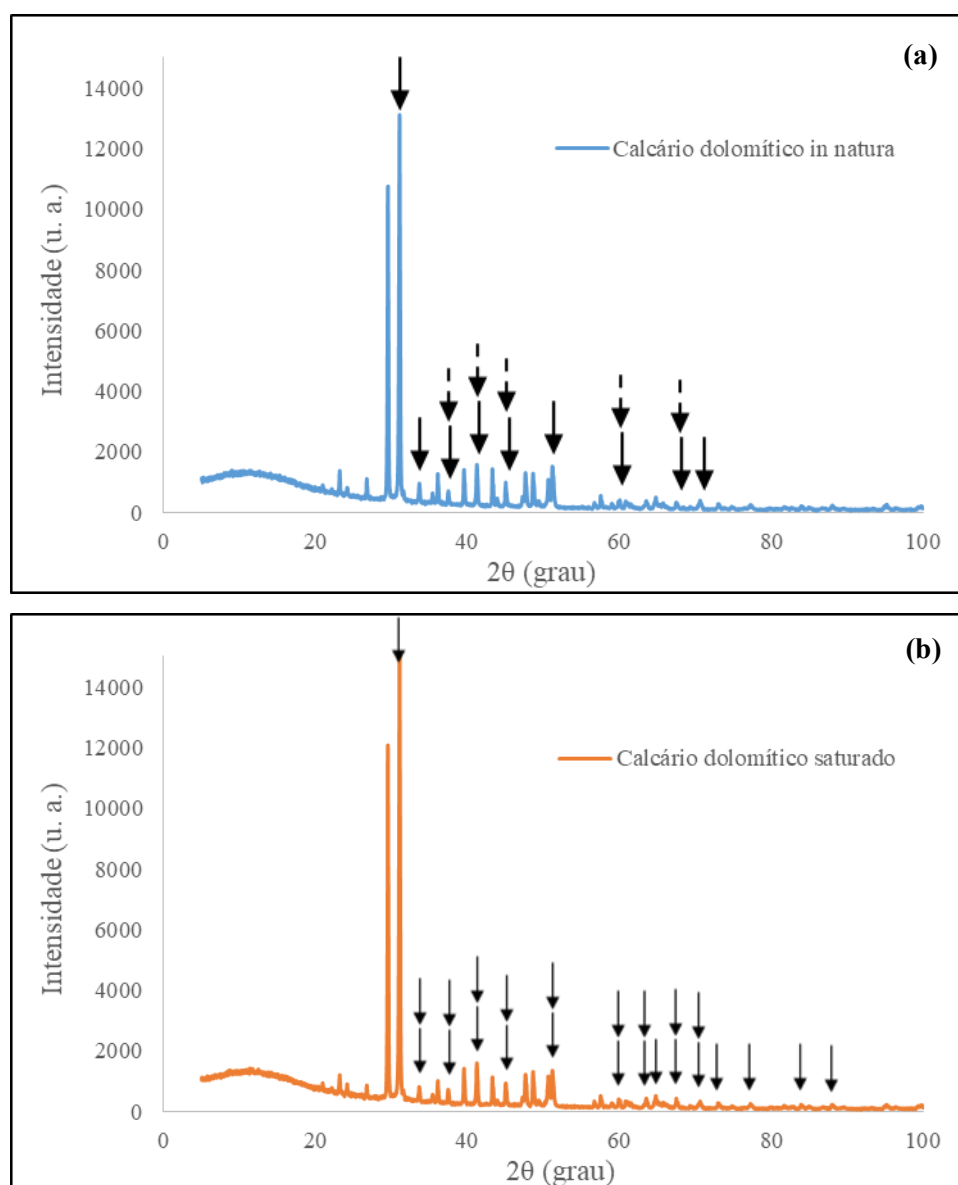
Fonte: Elaboração própria (2022).

A Figura 4 mostra os difratogramas de raios-X do calcário dolomítico in natura (a) e calcário dolomítico saturado com nutrientes (b), com a identificação de fases cristalinas das amostras, obtidas por meio do programa X'Pert HighScore Plus® - PANalytical®.

A análise de difração de raios-X realizada no pó do calcário dolomítico apresentado na Figura 4a ilustra que os principais componentes são carbonato de cálcio e magnésio ($\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$) e carbonato de cálcio, magnésio e ferro ($\text{Ca}(\text{Mg, Fe})(\text{CO}_3)_2$), de acordo com o que foi citado por Walker et al. (2003), que o calcário dolomítico às vezes pode conter vestígios de ferro. Segundo Soares et al. (2014), o teor de ferro do calcário dolomítico está ligado ao ortoclásio e a algum mineral amorfo presente.

Pode-se observar na Figura 4b que a adsorção de nutrientes tem o efeito de aumentar os picos encontrados no difratograma de raios X do calcário dolomítico in natura, deslocando os picos correspondentes ao carbonato de cálcio, magnésio e ferro ($\text{Ca}(\text{Mg, Fe})(\text{CO}_3)_2$). Destaca-se que durante a análise de DRX do calcário dolomítico saturado, também foram encontrados compostos de óxido de cálcio e magnésio, corroborando os resultados obtidos na análise de FTIR.

Figura 4. Difratoograma de raios X do calcário dolomítico in natura (a) e calcário dolomítico saturado com nutrientes (b).



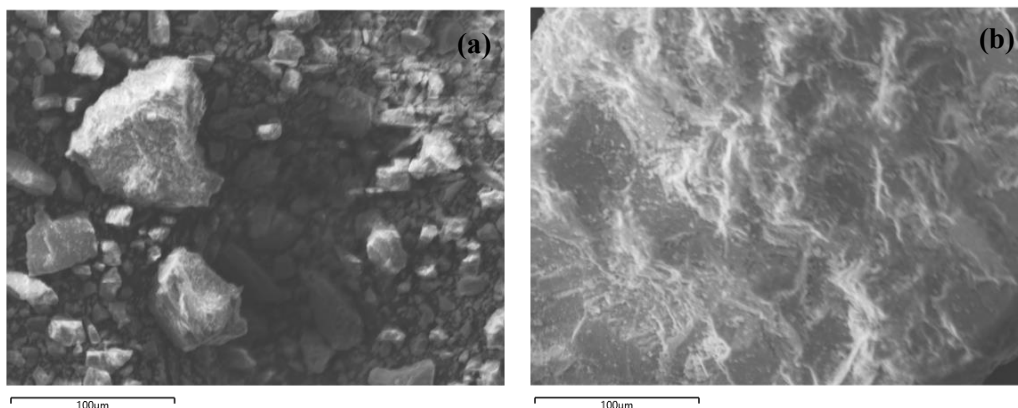
Fonte: Elaboração própria (2022).

- Representa carbonato de cálcio e magnésio: $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$.
- Representa carbonato de cálcio magnésio ferro: $\text{Ca} (\text{Mg, Fe}) (\text{CO}_3)_2$.

5.2.3. Informações Morfológicas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A Figura 5 mostra a morfologia superficial das amostras de calcário dolomítico antes (a) e depois (b) da adsorção de nutrientes.

Figura 5. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura do calcário dolomítico antes (a) e depois (b) da adsorção de nutrientes.



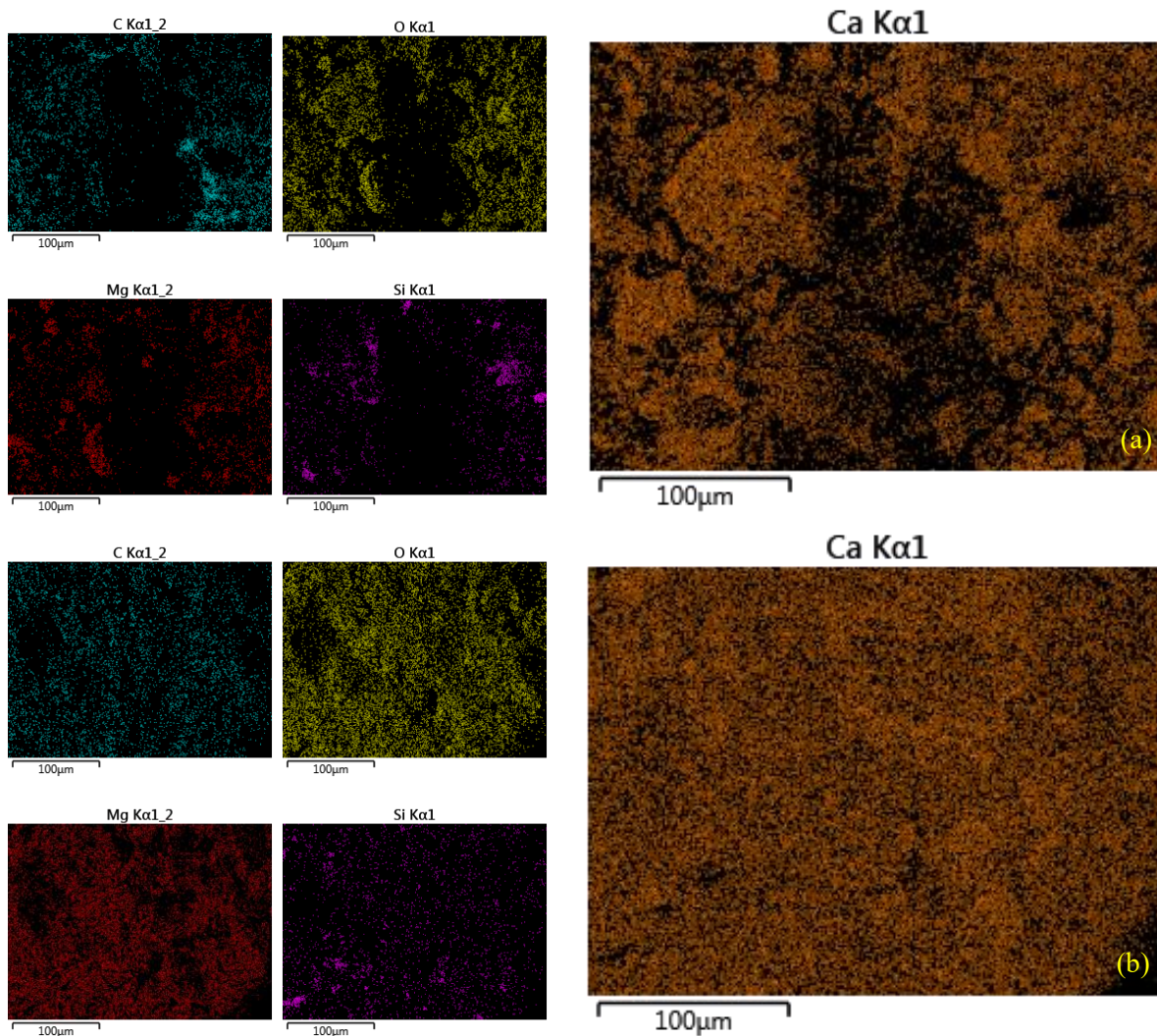
Fonte: Laboratório da UNILA (2022).

Na Figura 5a, observam-se grânulos irregulares relativamente grandes. Conforme a literatura, a estrutura do calcário dolomítico é composta por uma forma cristalina, e sua textura superficial complexa e porosa (Albadarin et al., 2012). Além disso, as superfícies de calcário dolomítico são consideradas ásperas e irregulares, também possui muitas porosidades, proporcionando bons locais de retenção para íons (Emami e Rahbar-Kelishami, 2016). Após a adsorção de nutrientes (Figura 5b), não foi possível observar grânulos, a superfície apresenta aspecto “lamacento” com a presença de bordas afiladas. A presença de partículas finas na superfície da amostra ressalta a natureza muito frágil do material usado no estudo (Salameh et al., 2015).

O mapeamento EDS e dispersão de elementos na amostra de calcário dolomítico in natura (a) e saturada com nutrientes (b) são apresentados na Figura 6. As figuras mostram qualitativamente os elementos presentes no material em estudo, sendo os mais representativos: carbono, oxigênio, magnésio, silício e cálcio.

Em relação às imagens de mapeamento na Figura 6b, verifica-se claramente que os elementos antes citados, se espalham homogeneamente sobre a amostra de calcário dolomítico após a adsorção. Os resultados são consistentes com os de Haddad et al. (2018) que estudaram a remoção de P de meios aquosos por serragem de cipreste pré-tratada com magnésio.

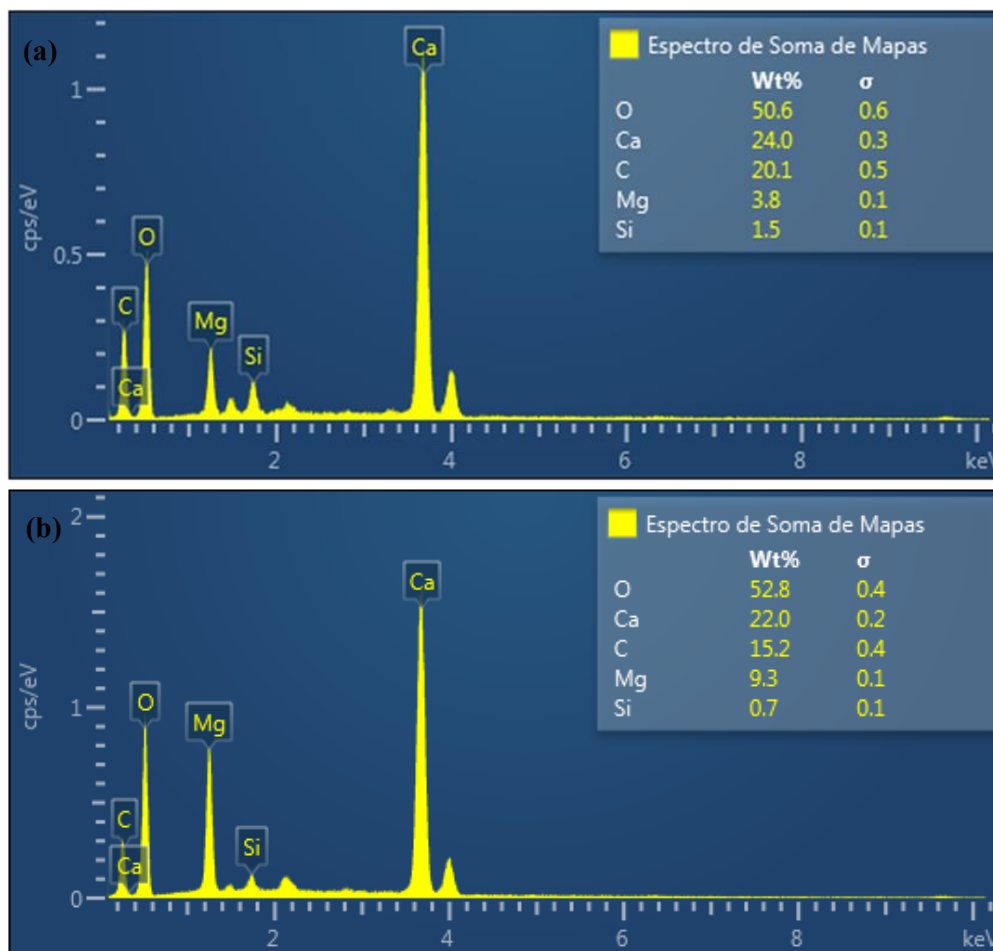
Figura 6. Mapeamento EDS e dispersão de elementos na amostra de calcário dolomítico in natura (a) e calcário dolomítico saturado com nutrientes (b).



Fonte: Laboratório da UNILA (2022).

Os espectros EDS e quantificação de microanálise química são apresentados na Figura 7. Os quais correspondem às amostras de calcário dolomítico in natura (a) e calcário dolomítico saturado com nutrientes (b), mostradas na Figura 6.

Figura 7. Espectros EDS e quantificação de microanálise química das amostras de calcário dolomítico mostrados na Figura 6 (a) e (b), respectivamente.



Fonte: Laboratório da UNILA (2022).

O espectro EDS na Figura 7a, apresenta picos com energias características de transições eletrônicas dos elementos carbono, oxigênio, magnésio, cálcio e silício, que coincide com a composição de calcário dolomítico natural relatada por Inferhuila (2015), que define a presença de silício como uma impureza. A principal impureza liberada pela amostra de calcário dolomítico em contato com a água é a sílica, seguida pelo cálcio e enxofre (Samudio, 2018). Conforme Diwan et al. (2020), o espectro do calcário dolomítico antes de passar pela adsorção revelou as seguintes informações: C: 17,99%, O: 54,46%, Mg: 8,11%, Si: 1,68%, Al: 0,28%, Na: 0,12% e Ca: 17,37%. Segundo a figura 7a, a composição em ordem proporcional é como segue: O>Ca>C>Mg>Si, correspondentes a 50,6%, 24,0%, 20,1%, 3,8% e 1,5%, respectivamente.

No espectro obtido para a amostra de calcário dolomítico saturado com nutrientes (Fig. 7b), observa-se a mesma composição citada acima.

5.2.4. Qualidade de Calcário Dolomítico In Natura e Calcário Dolomítico Saturado

Os resultados da análise do teor de cálcio e magnésio, poder de neutralização (PN), reatividade (RE), poder relativo de neutralização total (PRNT) do calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Qualidade de calcário dolomítico in natura e calcário dolomítico saturado.

Parâmetro	Calcário dolomítico in natura	Calcário dolomítico saturado
CaO	37,84%	38,74%
MgO	12,04%	12,33%
PN	97,59%	99,92%
RE	88,85%	90,71%
PRNT	86,71%	90,64%

Fonte: Elaboração própria (2024).

Considerando que o calcário dolomítico contém aproximadamente 21,6% Ca e 13,1% Mg (Espinosa e Molina, 1999), na Tabela 3 pode-se observar que o teor de cálcio no calcário dolomítico in natura é maior do que o mencionado, contendo 37,84% de CaO, com PN de 97,59% e PRNT de 86,71%. Destaca-se também que os resultados para os diferentes parâmetros analisados no calcário dolomítico saturado, são maiores que no calcário dolomítico in natura, onde foi obtido 38,74% de CaO, com PN de 99,92% e PRNT 90,64%. Além disso, a porcentagem de reatividade aumenta no calcário dolomítico depois de passar pelo processo de adsorção de nutriente, supondo que reagiram rapidamente gerando o efeito corretivo esperado no curtíssimo prazo.

5.3. ANÁLISE DO SOLO

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises físico-químicas realizadas nos dois tipos de solo. O solo de textura argilosa apresentou reação ácida alta quando medido em água (pH H₂O: 5,00) e concentração de alumínio de 0,30 cmol/dm³ (pouco tóxico). No solo com textura arenosa também foi observada reação ácida muito alta quando medido em água (pH H₂O: 4,55) e concentração de alumínio de 0,70 cmol/dm³ (tóxico). Classificações de alumínio correspondem a Alvarez et al. (1999) e Lima et al. (1989) apud Meneghetti (2018).

Os dois tipos de solos apresentaram muito baixo percentual de matéria orgânica e médio teor de fósforo. Em relação aos cátions básicos cálcio, magnésio e potássio, em solos argilosos apresentaram teores médio, alto e muito alto, respectivamente; enquanto no arenoso apresentaram teores baixo, muito baixo e baixo, na ordem dada. Classificações correspondem a Costa e Oliveira (2001 apud Meneghetti, 2018).

Esses resultados coincidem em alguns aspectos com o exposto em uma investigação, que consistiu na análise das características físico-químicas de dois tipos de solos, coletados em duas localidades do Departamento do Alto Paraná (Paraguai), um solo de textura argilosa do Distrito de Minga Guazú e outro de textura arenosa do Distrito de Yguazú, que posteriormente foram tratados com diferentes tipos e doses de calcário. O solo argiloso apresentou alto percentual de matéria orgânica e baixo teor de fósforo; enquanto o solo de textura arenosa, apresentou baixo percentual de matéria orgânica e médio teor de fósforo. Em relação aos cátions básicos, cálcio, magnésio e potássio apresentaram teores médios em solos argilosos, enquanto no arenoso apresentaram teores baixos (Samudio, 2020).

Tabela 4. Resultados das análises físico-químicas realizadas nos dois tipos de solo.

Variável	Solo argiloso	Solo arenoso
pH H ₂ O	5,00	4,55
SMP pH (cmol _c /dm ³)	5,82	6,26
H + Al (cmol _c /dm ³)	5,68	4,09
Al (cmol _c /dm ³)	0,30	0,70
Ca (cmol _c /dm ³)	3,20	0,24
Mg (cmol _c /dm ³)	2,34	0,11
K (cmol _c /dm ³)	0,64	0,05
Soma de bases (cmol _c /dm ³)	6,17	0,40
CTC (cmol _c /dm ³)	11,85	4,49
P (mg/dm ³)	4,77	3,11
C (g/dm ³)	14,22	5,81
Matéria Orgânica (%)	2,45	1,00
Saturação por Bases (%)	52,09	8,82
Saturação de Alumínio (%)	4,64	63,87
Areia (%)	37,44	81,60
Limo (%)	26,64	5,36
Argila (%)	35,92	13,04

Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com os resultados apresentados acima, foi determinada a quantidade de corretivo e fertilizante necessário para incorporar aos solos analisados.

5.4. TRATAMENTO DO SOLO

5.4.1. Efeito da Aplicação de Corretivo no pH de Solos Arenosos e Argilosos

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das análises estatísticas obtidas para o pH em solo arenoso e argiloso, após a aplicação dos diferentes tratamentos. Nela, observa-se o valor do referido parâmetro durante cada período de incubação, acompanhados por letras maiúsculas. As médias seguidas por letras diferentes são significativamente

diferentes ($p>0,05$), segundo o teste de Tukey. Os resultados enquanto a interação entre tratamentos e períodos são representados com letras minúsculas na Tabela e Figuras.

Tabela 5. Efeito da aplicação de corretivos sobre o pH de solos arenosos e argilosos.

Tratamento	Solo arenoso			Solo argiloso		
	30 dias	60 dias	90 dias	30 dias	60 dias	90 dias
T1(controle)	4,32 Aab	4,17 Aa	4,42 Aab	3,97 Aa	4,38 Abc	4,73 Acde
T2 (DN)	4,64 Bbc	5,08 Bc	6,42 Be	5,45 Bfg	4,67 Bcd	4,94 Bde
T3 (DS)	4,72 Bbc	5,63 Cd	6,06 Bde	5,58 Bg	4,93 Cde	5,11 Cef
T4 (DG)	4,58 Bab	4,59 ABab	4,49 Aab	4,04 Aab	4,50 Abc	4,61 Acd

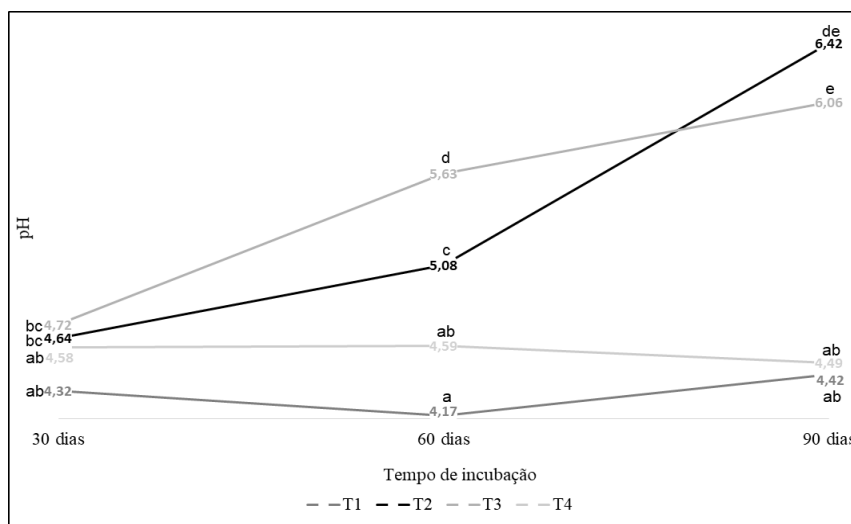
DN: calcário dolomítico in natura; DS: calcário dolomítico saturado; DG: calcário dolomítico granulado. (*) Média; seguido por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaboração própria (2024).

Conforme mostrado na Tabela 5, o pH do solo arenoso variou entre os tratamentos em cada período de incubação. Os níveis de pH aos 30 dias (entre tratamentos) apresentaram diferenças estatísticas significativas em comparação ao controle (T1). Aos 60 dias houve diferença significativa para T3 em relação a T1 e T4; enquanto aos 90 dias os resultados obtidos para T2 e T3 diferiram significativamente dos obtidos para T1 e T4.

Com relação ao solo argiloso, a Tabela 5 mostra que os valores de pH obtidos aos 30 e 90 dias para T2 e T3 diferiram significativamente daqueles obtidos para T1 e T4. Aos 60, os valores resultantes para T3 diferiram significativamente dos obtidos para T1, T2 e T4.

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os resultados obtidos para o pH enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados em solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Figura 8. Efeito da aplicação de corretivos sobre o pH de solo arenoso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

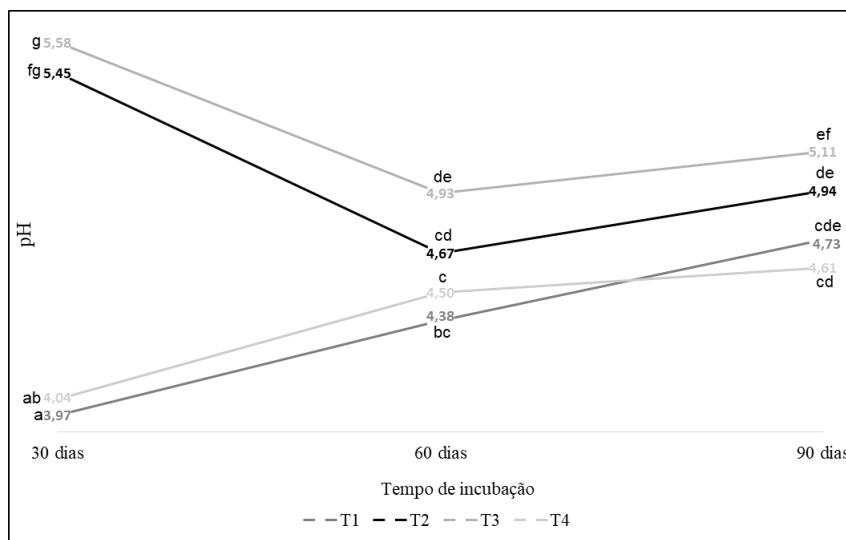
Enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados, ao longo do tempo, houve interação e efeito sobre o valor do pH no solo arenoso, atendendo o p-valor obtido da análise estatística: $<0,0001$. Ao testar a significância dos resultados, os tratamentos T1, T3 e T4 não apresentaram diferenças estatísticas significativas; mas, considerando os tratamentos T2 e T3 aos 90 dias, percebe-se uma diferença estatística significativa em comparação aos outros tratamentos, excetuando do T3 aos 60 dias. Na Figura 8, destacam-se os resultados obtidos no solo arenoso em relação ao pH, após ser tratado com T2 (calcário dolomítico in natura) e T3 (calcário dolomítico saturado), pois esse parâmetro aumentou no intervalo de 30 a 90 dias de 4,64 para 6,42 e 4,72 para 6,06, respectivamente. Segundo a escala de classificação de Oleynik et al. (1998 apud Meneghetti 2018, p. 62), os resultados de pH obtidos aos 30 e 60 dias, passaram de muito ácido a acidez baixa e média (aos 90 dias), respectivamente. Por outro lado, Peralta (2019), estudou o efeito de diferentes doses de material calcário no pH e na acidez trocável em solos ácidos de textura argilosa e arenosa. Os materiais utilizados foram calcário calcítico (CaCO_3), calcário dolomítico $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ e Marga (CaCO_3) impuro. Os tratamentos aplicados foram o controle, 500, 1.000, 2.500, 4.000 e 6.000 kg/ha dos diferentes corretivos, com três repetições cada, que posteriormente foram incubados por sessenta dias em frascos de 500 mL com 219 g de solo. Os resultados indicaram que ao utilizar 2.500 kg/ha de calcário dolomítico, o pH do solo arenoso aumentou de 4,66 para 5,51. Destacando o resultado obtido após 60 dias de incubação com o uso de calcário dolomítico saturado, sendo o valor 5,63 com dose de 2.747 kg/ha.

Em T4 (calcário dolomítico granulado), o pH teve uma leve diminuição de 4,58 para 4,49; embora essa redução não apresente diferença estatística significativa, vale ressaltar que o material corretivo não permitiu o aumento do pH do solo devido a sua granulometria, pois não reagiram no tempo estabelecido para o teste; isso foi evidenciado ao final do período de incubação, quando foram observados os grânulos do produto no solo. Pesquisas realizadas por Bellingieri, Alcarde e Souza (1989), Viadé et al. (2011) e Deus et al. (2014), que avaliaram a eficácia da granulometria dos corretivos, concluíram que a fração mais fina reage mais e eleva o pH do solo em menos tempo; no entanto, o efeito residual é mantido por um período mais curto em comparação com partículas maiores. Portanto, a eficiência dos materiais corretivos depende do tamanho das partículas, pois a velocidade de reação está diretamente relacionada à superfície de contato da partícula com o solo (Quiroga, 2014).

Enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados no solo

argiloso, ao longo do tempo, houve interação e efeito sobre o valor do pH no solo, atendendo o p-valor obtido da análise estatística: $<0,0001$. Porém, ao testar a significância dos resultados, os tratamentos T1 e T4 não apresentaram diferenças estatísticas significativas; mas, considerando o tratamento T3 (aos 30 dias), percebe-se uma diferença estatística significativa comparado aos outros tratamentos, excetuando do T2 (30 dias), que pode ser corroborado na Figura 9.

Figura 9. Efeito da aplicação de corretivos no pH de solo argiloso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Embora a análise estatística não tenha apresentado diferença significativa para T1 e T4, na Figura 9 pode-se observar uma tendência positiva, considerando o aumento do valor de pH para os referidos tratamentos. Em T1 (controle), o pH aumentou de 3,97 para 4,73 aos 90 dias. Enquanto que em T4 (calcário dolomítico granulado), os resultados de pH aumentaram até atingir 4,61 no final do período de incubação.

Em T2 (calcário dolomítico in natura) houve diminuição do parâmetro, obtendo-se um pH de 4,94 aos 90 dias. Em T3 (calcário dolomítico saturado), os valores de pH diminuíram para 4,93 aos 60 dias de estudo e aumentaram novamente para 5,11 aos 90 dias. Os resultados de pH para solo argiloso caem na faixa de classificação de acidez muito alta e alta, segundo Oleynik et al. (1998 apud Meneghetti 2018, p. 62). Os resultados de Peralta (2019), indicaram que ao utilizar 2.500 kg/ha de calcário dolomítico, o pH do solo argiloso aumentou de 4,28 para 4,79 aos 60 dias de incubação. Nesse sentido, destaca-se o resultado obtido na presente investigação com o uso de calcário dolomítico saturado, sendo o valor de pH de 4,93 aos 60 dias de incubação, com dose de 2.122 kg/ha.

A menor resposta do solo argiloso ao aumento do valor do pH pode dever-

se ao maior poder tamponante, assumindo que seja consequência das reservas de cátions acidificantes contidas nos minerais do solo (Samudio, 2020).

Em geral, nos solos arenosos, os efeitos da calagem são repentinos e de curta duração, para os quais são recomendadas quantidades menores de corretivo, mas em períodos mais curtos. Já para solos argilosos serão necessários aportes maiores do material corretivo, porém mais distantes no tempo. Como regra, materiais corretivos de ação lenta são recomendados para solos arenosos, enquanto materiais de ação rápida são recomendados para solos argilosos. Cruzado (2017), indica o uso de calcário calcítico e dolomítico para solos arenosos; para solos argilosos, cal virgem ou apagada. Considerando os resultados obtidos na presente investigação, o calcário dolomítico saturado (T3) apresentou boa afinidade com os dois tipos de solos trabalhados, demonstrando maior efetividade na redução da acidez do solo arenoso, o que pode ser devido ao aumento do PRNT no calcário dolomítico saturado, pois tendo um PRNT maior, mais reativo é o corretivo.

5.4.2. Efeito da Aplicação de Corretivo no Alumínio (Al) de Solos Arenosos e Argilosos

Na Tabela 6, apresenta-se os resultados das análises estatísticas obtidas para o alumínio (Al) ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) em solo arenoso e argiloso, após a aplicação dos diferentes tratamentos. Nela, observa-se o teor do referido parâmetro em cada período de incubação, acompanhados por letras maiúsculas. As médias seguidas por letras diferentes são significativamente diferentes ($p>0,05$), segundo o teste de Tukey. Os resultados enquanto a interação entre tratamentos e períodos são representados com letras minúsculas na Tabela e Figuras.

Tabela 6. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Alumínio (Al) de solos arenosos e argilosos.

Tratamento	Solo arenoso			Solo argiloso		
	30 dias	60 dias	90 dias	30 dias	60 dias	90 dias
T1(controle)	0,19 Bb	0,71 Bc	0,75 Bc	0,56 Bc	0,24 Bb	0,23 Bb
T2 (DN)	0,06 Aa	0 Aa	0 Aa	0 Aa	0,08 Aa	0 Aa
T3 (DS)	0,06 Aa	0 Aa	0 Aa	0 Aa	0,06 Aa	0 Aa
T4 (DG)	0,20 Bb	0,66 Bc	0,71 Bc	0,55 Bc	0,21 Bb	0,21 Bb

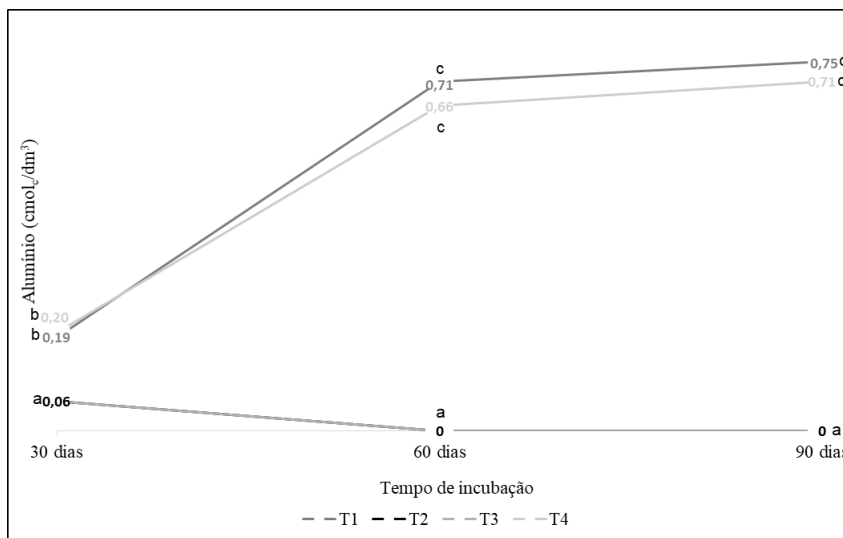
DN: calcário dolomítico in natura; DS: calcário dolomítico saturado; DG: calcário dolomítico granulado. (*) Média; seguido por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaboração própria (2024).

Conforme exposto na Tabela 6, tanto no solo arenoso como argiloso, o teores de Al obtidos para T2 e T3 diferiram significativamente dos obtidos para T1 e T4 durante os 30, 60 e 90 dias de estudo.

As Figuras 10 e 11 mostram os resultados obtidos para o alumínio

enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados em solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Figura 10. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Alumínio do solo arenoso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

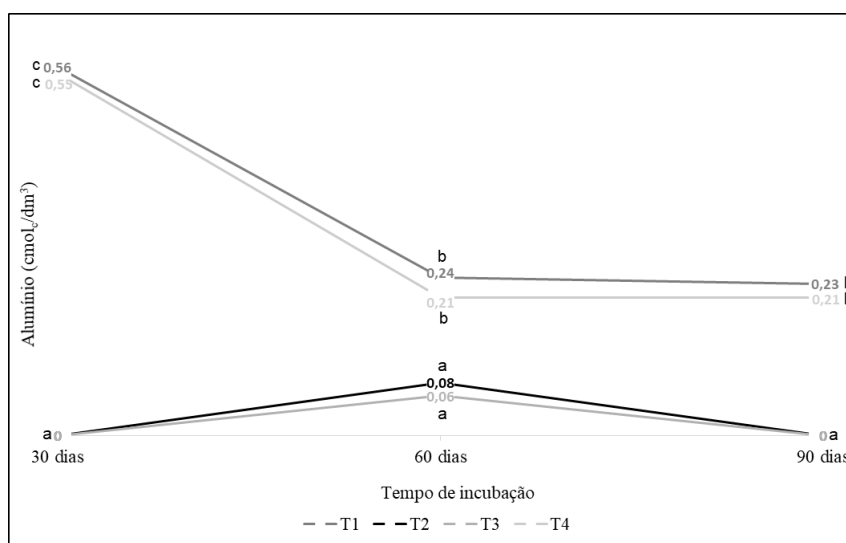
Atendendo o p-valor obtido ($<0,0001$) da análise estatística enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados, confirma-se que houve interação e efeito sobre o valor do Al no solo arenoso. Ao testar a significância dos resultados, os tratamentos T2 e T3 apresentaram diferenças estatísticas significativas daqueles resultados obtidos para T1 e T4. Também houve diferença entre os resultados obtidos para T1 e T4 aos 30 dias, comparados aos valores obtidos aos 60 e 90 dias. Na Figura 10, destacam-se os resultados obtidos no solo arenoso em relação ao teor de alumínio, após ser tratado com calcário dolomítico in natura (T2) e calcário dolomítico saturado (T3), pois as concentrações de Al diminuíram aos 30 dias para $0,06 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$. Aos 60 dias, as concentrações diminuíram de acordo com o aumento do pH, até não ser detectado analiticamente, mantendo-se o referido resultado até o final do período de incubação. Isso pode ter sido causado pela elevação do pH, que, por sua vez, permitiu um aumento apreciável da CTC, mantendo o Al fixado nas partículas de argila, impedindo seu deslocamento na solução do solo (Espinosa e Molina, 1999) ou pode ter ocorrido a precipitação de Al^{+3} na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Kinraid, 1991). Os níveis de Al obtidos no T2 e T3 são classificados como não tóxicos, segundo Alvarez et al. (1999) e Lima et al. (1989) apud Meneghetti (2018).

Nas amostras T1 (controle) e T4 (calcário dolomítico granulado), as concentrações de Al apresentaram um leve aumento. No T1 (controle), o Al aumentou de $0,19 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$ aos 30 dias para $0,75 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$ aos 90 dias. No T4 (calcário dolomítico

granulado), a concentração de Al aumentou de 0,20 para 0,71 $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$ (de 30 para 90 dias). O calcário dolomítico granulado requer mais tempo (superior a 90 dias) para reagir com o solo ou entrar em dissolução, por isso se comporta igual ao controle. Segundo Alvarez et al. (1999) e Lima et al. (1989) apud Meneghetti (2018), os teores de Al obtidos em T1 e T4 são classificados como tóxicos.

Sobre a interação entre tratamentos e períodos estudados no solo argiloso, ao longo do tempo, houve interação e efeito sobre o valor de Al do solo, atendendo o p-valor obtido da análise estatística: $<0,0001$. Ao testar a significância dos resultados, os tratamentos T2 e T3 apresentaram diferenças estatísticas significativas daqueles resultados obtidos para T1 e T4. Também houve diferença entre os resultados obtidos para T1 e T4 aos 30 dias, comparados aos valores obtidos aos 60 e 90 dias.

Figura 11. Efeito da aplicação de corretivos no Alumínio do solo argiloso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 11, destaca-se a neutralização total do Al em T2 (calcário dolomítico in natura) e T3 (calcário dolomítico saturado) aos 30 dias de estudo. Também, a diminuição progressiva da concentração do referido elemento em T1 (controle) e T4 (calcário dolomítico granulado) aos 60 dias.

Em T1 (controle) foi observada redução progressiva do teor de alumínio ao longo do período de estudo, sendo 0,23 $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$ a concentração aos 90 dias. Em T2 (calcário dolomítico in natura) e T3 (calcário dolomítico saturado), o Al foi completamente reduzido após 30 dias, mantendo essa concentração aos 90 dias. Em T4 (calcário dolomítico granulado), a concentração de Al diminuiu gradualmente aos 60 dias, mantendo o mesmo teor aos 90 dias, com uma concentração de 0,21 $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$. Os níveis de Al obtidos no T2

e T3 são classificados como não tóxicos, no entanto, o exposto no T1 e T4 são classificados como pouco tóxicos, segundo Alvarez et al. (1999) e Lima et al. (1989) apud Meneghetti (2018).

A diminuição do teor de alumínio deve-se ao aumento do pH do solo, este efeito é apreciado pelas relações negativas entre as duas variáveis, nos dois tipos de solos, provocando a precipitação de Al^{+3} na forma de $Al(OH)_3$ (Kinraid, 1991).

Samudio (2020), estudou o efeito de correções com calcários (dolomítico, algas calcárias, algas calcárias com 1/3 da dose recomendada e dois calcários experimentais) nas propriedades químicas e biológicas de solos incubados no Alto Paraná, Paraguai. Todos os corretivos diminuíram a concentração de Al nos solos estudados, sendo os tratamentos que obtiveram os melhores resultados: calcário dolomítico, algas na dose completa e os dois calcários experimentais. Em relação ao período de incubação, no solo argiloso, houve redução progressiva do teor de alumínio ao longo do período de estudo, enquanto, no caso do solo arenoso, o Al foi totalmente reduzido após 30 dias, mantendo essa concentração até o final do período de incubação. Esta última reação ocorreu na presente investigação com tratamentos T2 e T3, mas de forma contrária, no solo argiloso.

5.4.3. Efeito da Aplicação de Corretivo no Cálcio (Ca) de Solos Arenosos e Argilosos

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises estatísticas obtidas para o cálcio (Ca) ($cmol/dm^3$) em solo arenoso e argiloso, após a aplicação dos diferentes tratamentos. Nela, observa-se o teor do referido parâmetro em cada período de incubação, acompanhados por letras maiúsculas. As médias seguidas por letras diferentes são significativamente diferentes ($p > 0,05$), segundo o teste de Tukey. Os resultados enquanto a interação entre tratamentos e períodos são representados com letras minúsculas na Tabela e Figuras.

Tabela 7. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Cálcio (Ca) de solos arenosos e argilosos.

Tratamento	Solo arenoso			Solo argiloso		
	30 dias	60 dias	90 dias	30 dias	60 dias	90 dias
T1(controle)	0,34 Aa	0,46 Aa	0,46 Aa	3,49 Abcd	3,06 Aab	3,32 ABabc
T2 (DN)	1,44 Bb	1,75 Bb	1,81 Bb	3,80 ABcde	3,74 Bcde	3,72 BCcde
T3 (DS)	1,35 Bb	1,41 Bb	1,32 Bb	4,18 Be	3,74 Bcde	4,03 Cde
T4 (DG)	0,24 Aa	0,64 Aa	0,35 Aa	3,34 Aabc	2,77 Aa	3,07 Aab

DN: calcário dolomítico in natura; DS: calcário dolomítico saturado; DG: calcário dolomítico granulado. (*) Média; seguido por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaboração própria (2024).

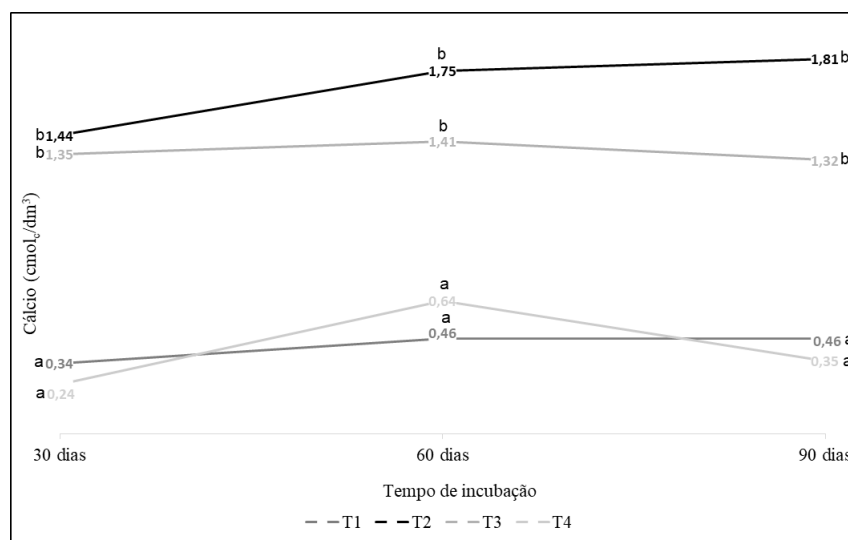
A Tabela 7 mostra que os resultados obtidos para T2 e T3 no solo arenoso

diferiram significativamente daqueles obtidos para T1 e T4, durante os 30, 60 e 90 dias de estudo. Em relação ao solo argiloso, a tabela mostra que no período de estudo de 30 e 90 dias, os resultados para T3 diferem significativamente daqueles obtidos para T1 e T4, mas não para T2. Por outro lado, os resultados obtidos após 60 dias de incubação tanto para T2 como para T3 diferiram significativamente daqueles obtidos para T1 e T4.

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados obtidos para o cálcio enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados em solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Atendendo o p-valor de 0,3498 obtido da análise estatística enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados, confirma-se que não houve interação e efeito sobre o Ca do solo arenoso. Não obstante, ao testar a significância dos resultados, os tratamentos T2 e T3 apresentaram diferenças estatísticas significativas daqueles resultados obtidos para T1 e T4, que pode ser corroborado na Figura 12.

Figura 12. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Cálcio do solo arenoso.

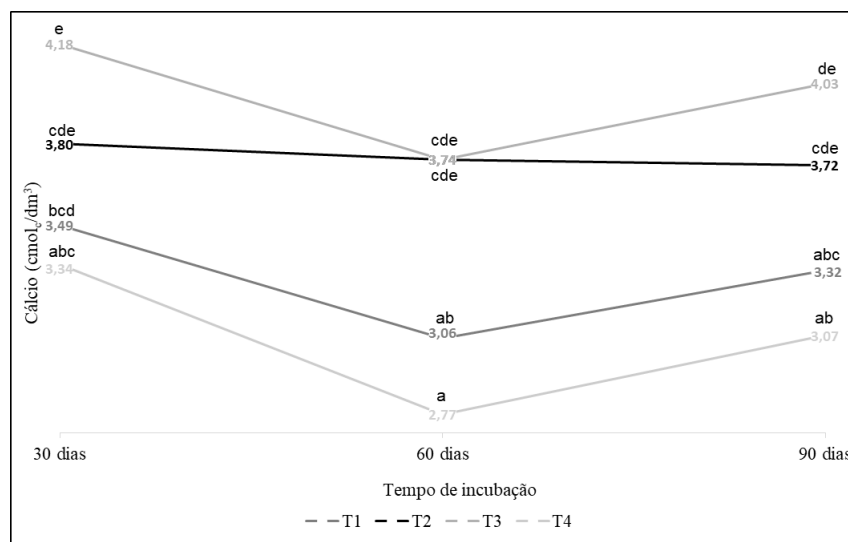


Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 12 destacam-se os resultados obtidos no solo arenoso em relação ao teor de Ca, após tratamento com T2 (calcário dolomítico in natura), pois os teores passaram de 1,44 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (obtido aos 30 dias) para 1,81 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (obtido aos 90 dias), sem diferir estatisticamente do T3 (calcário dolomítico saturado) cujos teores foram de 1,35 e 1,32 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ aos 30 e 90 dias, respectivamente. Os teores de Ca obtidos no T2 e T3 são classificados como baixos (Da Silva, 2009). O calcário dolomítico granuloso se comporta igual ao controle, indicado que pode ser necessário mais tempo para que este possa reagir com o solo.

Enquanto aos resultados sobre interação entre tratamentos e períodos estudados no solo argiloso, não houve interação e efeito sobre o Ca do solo, atendendo o p-valor de 0,5534 obtido da análise estatística. Ao testar a significância dos resultados, os obtidos em T3 aos 30 e 90 dias, apresentaram diferenças estatísticas significativas daqueles resultados obtidos para T1 e T4, excetuando o T2.

Figura 13. Efeito da aplicação de corretivos no Cálcio do solo argiloso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 13, sobressaem os teores de Ca obtidos no T3 (calcário dolomítico saturado), cuja concentração atingiu $4,18 \text{ cmol/dm}^3$ aos 30 dias, permanecendo na faixa de $4,08 \text{ cmol/dm}^3$ ao final do período de incubação. No T2 (calcário dolomítico in natura), a concentração do elemento em estudo permaneceu constante durante todo o período de incubação, sendo o valor de Ca $3,72 \text{ cmol/dm}^3$ aos 90 dias. Os teores de Ca obtidos no T3 e T2, ao finalizar o período de incubação, são classificados como alto e médio, respectivamente (Costa e Oliveira, 2001 apud Meneghetti, 2018; Da Silva, 2009). Os maiores teores foram encontrados aos 30 dias de estudo, destacando a rápida reação do cátion com o tipo de solo utilizado. Isso se deve à textura, por possuir maior superfície de reação que o solo arenoso, possibilitando maior dissolução do calcário aplicado ao solo. Melo et al. (2006), verificaram que em solos argilosos ocorreu maior retenção dos cátions K^+ , Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , o que é, portanto, influenciado pela textura do solo. Além disso, de acordo com Vitti, Lima e Cicarone (2006), a baixa mobilidade do Ca no perfil do solo em razão da sua retenção nas cargas negativas das argilas e da matéria orgânica, podem favorecer os teores de Ca disponíveis após a aplicação de calcário.

5.4.4. Efeito da Aplicação de Corretivo no Magnésio (Mg) de Solos Arenosos e Argilosos

A Tabela 8 apresenta os resultados das análises estatísticas obtidas para o magnésio (Mg) (cmol/dm^3) em solo arenoso e argiloso, após a aplicação dos diferentes tratamentos. Nela, observa-se o teor do referido parâmetro em cada período de incubação, acompanhados por letras maiúsculas. As médias seguidas por letras diferentes são significativamente diferentes ($p > 0,05$), segundo o teste de Tukey. Os resultados enquanto a interação entre tratamentos e períodos são representados com letras minúsculas na Tabela e Figuras.

Tabela 8. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Magnésio (Mg) de solos arenosos e argilosos.

Tratamento	Solo arenoso			Solo argiloso		
	30 dias	60 dias	90 dias	30 dias	60 dias	90 dias
T1 (controle)	0,14 Aa	0,07 Aa	0,12 Aa	1,93 Aabc	1,59 Aa	1,53 Aa
T2 (DN)	0,85 Bbc	0,97 Cc	0,79 Bbc	3,18 Cg	2,71 Cef	2,29 Bcde
T3 (DS)	0,80 Bbc	0,71 Bb	0,71 Bb	3,21 Cg	2,79 Cfg	2,46 Bdef
T4 (DG)	0,09 Aa	0,07 Aa	0,11 Aa	2,61 Bef	2,10 Bbcd	1,80 Aab

DN: calcário dolomítico in natura; DS: calcário dolomítico saturado; DG: calcário dolomítico granulado. (*) Média; seguido por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaboração própria (2024).

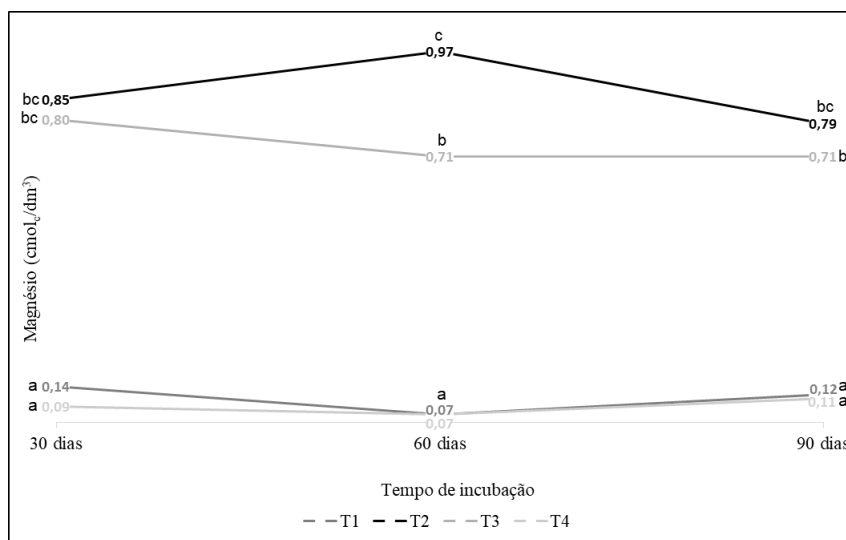
A Tabela 8 mostra que no solo arenoso, os resultados obtidos para T2 e T3 apresentaram diferenças estatísticas significativas dos obtidos para T1 e T4, aos 30, 60 e 90 dias de estudo. O resultado de T2 aos 60 dias diferiu significativamente do T3.

Em relação ao solo argiloso, a Tabela 8 mostra que no período estudado, os resultados para T2 e T3 diferiram significativamente daqueles obtidos para T1 e T4.

As Figuras 14 e 15 mostram os resultados obtidos para o magnésio enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados em solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Atendendo o p-valor de 0,0437 obtido da análise estatística enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados, confirma-se que houve interação e efeito sobre o Mg do solo arenoso. Ao testar a significância dos resultados, os tratamentos T2 e T3 apresentaram diferenças estatísticas significativas daqueles resultados obtidos para T1 e T4, que pode ser corroborado na Figura 14.

Figura 14. Efeito da aplicação de corretivos no Magnésio do solo arenoso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

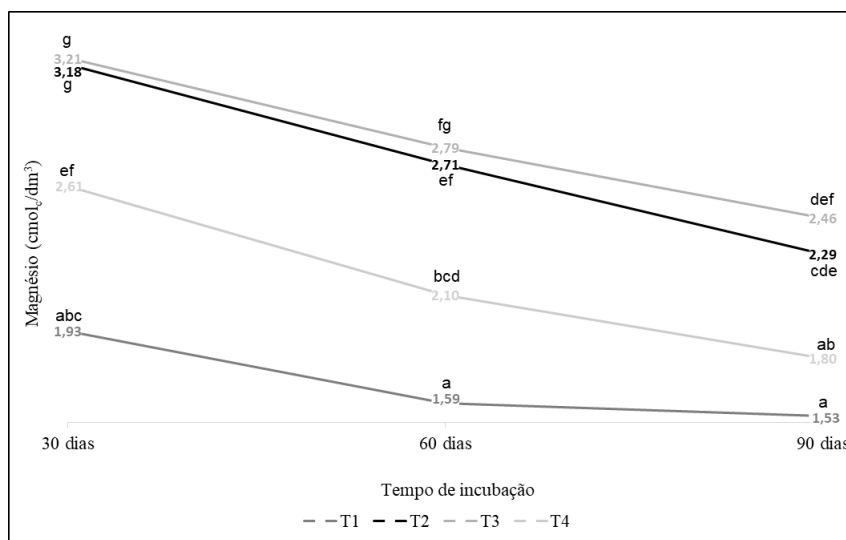
Na Figura 14, destaca-se o resultado obtido no solo arenoso em relação ao teor de magnésio, após tratamento com T2 (calcário dolomítico in natura), pois o teor aumentou de 0,85 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (obtido aos 30 dias) para 0,97 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (obtido aos 60 dias), diferindo estatisticamente do T3 (calcário dolomítico saturado) neste último período mencionado.

Em relação ao T3 (calcário dolomítico saturado), o Mg apresentou um teor de 0,80 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ aos 30 dias, posteriormente, apresentou uma leve redução, mantendo-se até o final do período de estudo em 0,71 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$. Os teores de Mg obtidos aos 90 dias tanto no T2 como T3 são classificados como médios (Da Silva, 2009).

Por outro lado, em T1 (controle) e T4 (calcário dolomítico granulado), os teores de Mg foram muito baixos, atingindo valores máximos de 0,14 e 0,11 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, respectivamente.

Enquanto aos resultados sobre interação entre tratamentos e períodos estudados no solo argiloso, não houve interação e efeito sobre o Mg do solo, atendendo o p-valor de 0,2566 obtido da análise estatística. Porém, ao testar a significância dos resultados, os valores obtidos em T3 (aos 30 e 60 dias) e T2 (aos 30 dias) apresentaram diferenças estatísticas, comparados com os demais resultados. Além disso, o T4 apresentou diferenças estatísticas significativas em relação ao T1 no período de 30 e 60 dias; sendo 2,61 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ o maior teor encontrado, o qual foi obtido aos 30 dias de estudo, posteriormente esse valor foi reduzido para 1,80 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ ao final do período de incubação.

Figura 15. Efeito da aplicação de corretivos no Magnésio do solo argiloso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Conforme a Figura 15, os teores mais elevados de Mg foram obtidos aos 30 dias, sendo 3,21 e 3,18 cmol_c/dm³ para T3 e T2, respectivamente. Apesar das reduções apresentadas em termos de teor de Mg nos diferentes tratamentos aplicados no presente estudo, todos são classificados como altos (Costa e Oliveira, 2001 apud Meneghetti, 2018; Da Silva, 2009).

Com a aplicação de calcário dolomítico, houve aporte de magnésio, o que resultou no aumento da quantidade desse elemento disponível no solo. Resultados semelhantes foram obtidos em estudos realizados por Oliveira et al. (2002) e Cano-Betancur, Gallego-Becerra e Chavarriaga-Montoya (2011).

Principalmente no solo argiloso, o calcário dolomítico saturado apresentou reação destacada em termos de aumento de pH e teor de cálcio e magnésio aos 30 dias de estudo. Foi demonstrado que a lixiviação de Ca e/ou Mg do calcário é elevada em solos com texturas leves e alta capacidade de infiltração (Espinosa e Molina, 1999).

Solos mais argilosos retêm mais cátions nas suas cargas. Segundo Osorno (2012), o efeito do calcário é muito variável e depende da dose de aplicação, do tipo de solo (textura, solos arenosos retêm menos, ao contrário de solos mais argilosos; capacidade tampão, quanto maior, mais difícil será modificar o pH do solo), clima (quanto maior a chuva, menor a duração do efeito), topografia (solos com declives acentuados são susceptíveis a mais lavagens) e depende do tipo de cultura (as leguminosas são exigentes em Ca, eles acidificam o solo).

Samudio (2020), observou aumento significativo no teor de Mg com a aplicação dos diferentes corretivos calcários, mais acentuados com o uso do calcário

dolomítico nos dois tipos de solo. A dose de calcário dolomítico utilizada foi: 2.400 e 4.000 kg/ha em solo arenoso e argiloso, respectivamente. Em relação ao período de incubação, no solo argiloso foi observado um aumento significativo até os 90 dias, porém, no solo arenoso, o efeito foi muito mais rápido e em curto prazo, observando-se o efeito aos 30 dias. O calcário dolomítico causou aumento de 1,55 cmol/dm³ aos 90 dias e 0,75 cmol/dm³ aos 30 dias, em solos argilosos e arenosos, respectivamente, diferente dos resultados da presente investigação, pois a reação foi mais rápida no solo argiloso, obtendo o maior teor aos 30 dias.

5.4.5. Efeito da Aplicação de Corretivo no Fósforo (P) de Solos Arenosos e Argilosos

A Tabela 9 apresenta os resultados das análises estatísticas obtidas para o fósforo (P) (mg/dm³) em solo arenoso e argiloso, após a aplicação dos diferentes tratamentos. Nela, observa-se o teor do referido parâmetro em cada período de incubação, acompanhados por letras maiúsculas. As médias seguidas por letras diferentes são significativamente diferentes ($p > 0,05$), segundo o teste de Tukey. Os resultados enquanto a interação entre tratamentos e períodos são representados com letras minúsculas na Tabela e Figuras.

Tabela 9. Efeito da aplicação de corretivos sobre o Fósforo (P) de solos arenosos e argilosos.

Tratamento	Solo arenoso			Solo argiloso		
	30 dias	60 dias	90 dias	30 dias	60 dias	90 dias
T1(controle)	5,83 Babc	5,86 Aabc	6,52 Bc	4,83 Aab	7,24 Bc	5,93 Bb
T2 (DN)	5,27 ABa	6,55 Ac	6,23 ABbc	5,67 Bab	5,93 ABb	4,71 Aa
T3 (DS)	5,15 Aa	6,59 Ac	5,99 ABabc	4,58 Aa	5,64 Aab	4,87 Aab
T4 (DG)	5,13 Aa	6,03 Aabc	5,57 Aab	4,60 Aa	5,64 Aab	4,79 Aab

DN: calcário dolomítico in natura; DS: calcário dolomítico saturado; DG: calcário dolomítico granulado. (*) Média; seguido por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaboração própria (2024).

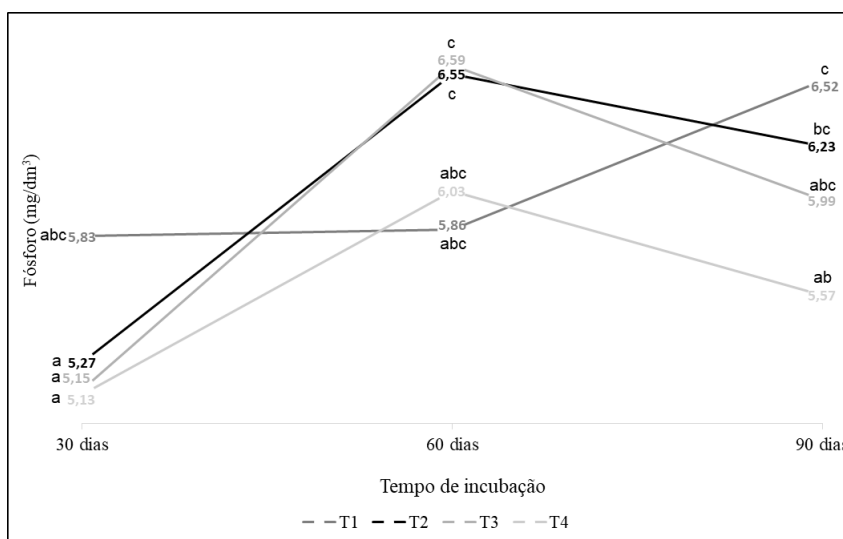
Conforme exposto na Tabela 9, no solo arenoso, os teores de P obtidos no T2, T3 e T4 aos 30 dias não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Além disso, T1 apresentou diferença estatística significativa em relação a T3 e T4. Aos 60 dias, os resultados não demonstraram diferenças estatísticas significativas. Aos 90 dias, o resultado obtido para T1 diferiu significativamente do T4, mas não daqueles derivados de T2 e T3.

No solo argiloso, o teor de P obtido no T2 aos 30 dias apresentou diferença estatística significativa em relação aos demais tratamentos. Aos 60 dias, o resultado obtido para T1 diferiu significativamente daqueles obtidos para T3 e T4. Aos 90 dias, o teor resultante do T1 demonstrou diferença significativa em comparação aos demais tratamentos.

As Figuras 16 e 17 mostram os resultados obtidos para o fósforo enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados em solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Atendendo o p-valor de 0,0037 obtido da análise estatística enquanto a interação entre tratamentos e períodos estudados, confirma-se que houve interação e efeito sobre o P do solo arenoso. Ao testar a significância dos resultados, os valores obtidos dos tratamentos T1 (60 dias), T2 (60 e 90 dias) e T3 (90 dias) apresentaram diferenças estadísticas significativas daqueles resultados obtidos para T1 e T4, que pode ser corroborado na Figura 16.

Figura 16. Efeito da aplicação de corretivos no Fósforo do solo arenoso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

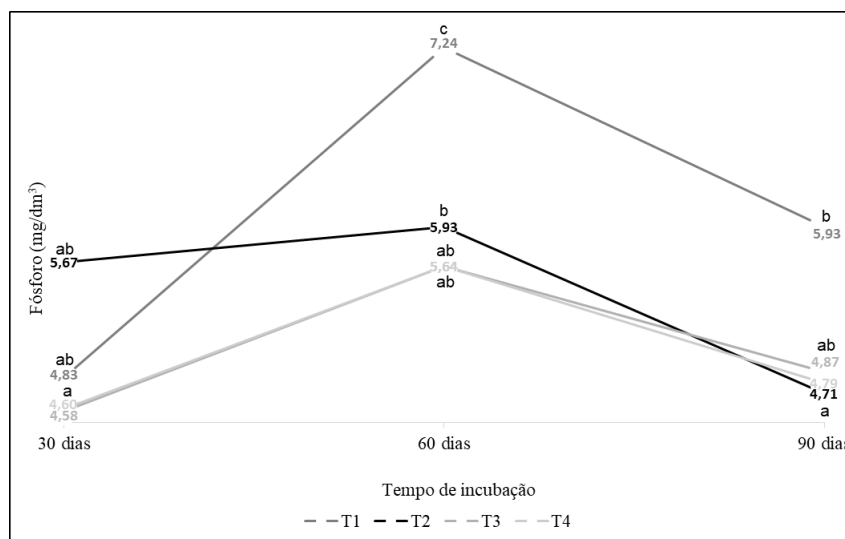
Na Figura 16, destacam-se os resultados obtidos no solo arenoso em relação ao teor de P aos 60 dias de estudo, visualiza-se aumento no teor de P, com a aplicação dos tratamentos T2 (calcário dolomítico in natura), T3 (calcário dolomítico saturado) e T4 (calcário dolomítico granulado), sendo os valores máximos obtidos aos 60 dias de 6,55; 6,59 e 6,03 mg/dm³, respectivamente. O valor máximo obtido para T1 (controle) foi de 6,52 mg/dm³ aos 90 dias de estudo. Todos os valores mencionados, são classificados como altos (Da Silva, 2009), considerando o nível requerido pela cultura do feijão.

Castro e Gómez (2008) relataram que dependendo das fontes de calagem utilizadas, seus mecanismos de reação enriquecem a fase trocável com Ca²⁺ e Mg²⁺; uma vez que ocorre o deslocamento do alumínio trocável na solução do solo, induzindo uma melhora na concentração de bases. Por outro lado, Cano-Betancur, Gallego-Becerra e Chavarriaga-Montoya (2011), mencionam que à medida que o pH se torna menos ácido (pH

maior que 5,5), o fósforo aumenta sua disponibilidade ou solubilidade; isso explica o aumento no teor de P no T3 alcançado aos 60 dias, pois no período citado, o pH do solo tratado com calcário dolomítico saturado aumentou a 5,63.

Enquanto aos resultados sobre interação entre tratamentos e períodos estudados no solo argiloso, houve interação e efeito sobre o P do solo, atendendo o p-valor de 0,0008 obtido da análise estatística. Ao testar a significância dos resultados, o valor obtido em T1 (aos 60 dias) apresentou diferença estatística, comparado com os demais resultados.

Figura 17. Efeito da aplicação de corretivos no Fósforo do solo argiloso.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 17 destacam-se os teores de P obtidos aos 60 dias, eles apresentaram aumento em comparação ao período de 30 dias, apesar dos valores de pH nesse período terem sido os mais baixos encontrados no presente estudo, sendo inferiores a 5,0. Os teores diminuiram novamente aos 90 dias de estudo.

Espinosa e Molina (1999), mencionam que o efeito da calagem em solos tropicais geralmente leva à confusão quanto à disponibilidade de P. A aplicação de calcário nesse tipo de solo corrige a toxicidade de Al e a deficiência de Ca e a correlação desses fatores permite um aumento na absorção de P mesmo que a calagem tenha muito pouco efeito na disponibilidade e fixação de P, principalmente em pH superior a 5,0-5,5 onde a retenção de P ocorre principalmente por reações de argilas que possuem alta afinidade por este item.

Segundo Kass (1996), a retenção de fósforo, em pH abaixo de 5,5, é principalmente devido à sua reação com ferro e alumínio, precipitando como fosfato de ferro (FePO_4) e alumínio (AlPO_4).

Os teores de P são classificados como alto para T1 e médio para T2, T3 e T4, ao finalizar o período de estudo (Costa e Oliveira, 2001 apud Meneghetti, 2018; Da Silva, 2009).

5.5. DESEMPENHO AGRONÔMICO DO FEIJÃO

Os resultados das análises estatísticas para o desempenho agronômico do feijão são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Desempenho agronômico do feijão.

Tratamento	Solo arenoso				Solo argiloso			
	Número de vagens	Comprimento de vagens (cm)	Número de grãos/vagens	Peso de 100 grãos (g)	Número de vagens	Comprimento de vagens (cm)	Número de grãos/vagens	Peso de 100 grãos (g)
T1(controle)	2,00 A	7,62 A	2,00 A	24,80 A	4,60 A	7,39 A	2,20 A	23,60 A
T2 (DN)	3,00 A	7,81 A	2,00 A	23,80 A	5,20 A	7,78 A	3,00 A	21,40 A
T3 (DS)	3,00 A	8,05 A	1,80 A	24,80 A	4,00 A	7,46 A	3,00 A	24,00 A
T4 (DG)	2,20 A	7,31 A	2,00 A	15,00 B	4,60 A	7,32 A	2,00 A	23,60 A

DN: calcário dolomítico in natura; DS: calcário dolomítico saturado; DG: calcário dolomítico granulado. (*) Média; seguido por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaboração própria (2024).

A Tabela 10 mostra que os resultados nos dois tipos de solo, tanto nos tratamentos como no controle, não apresentaram diferenças estatísticas significativas em termos de número de vagens, comprimento de vagens e número de grãos/vagens, excetuando o peso de 100 grãos obtido no solo arenoso, pois os dados de T1, T2 e T3 diferiram significativamente do T4. No entanto, no solo argiloso, não se observaram diferenças estatísticas significativas nos resultados obtidos para esse parâmetro.

Na variável número de vagens obtidas no solo arenoso, para os tratamentos T2 e T3 obteve-se o mesmo resultado, sendo o valor 3; para o T1 e T4 o número de vagens foi 2 e 2,20, respectivamente.

Quanto ao comprimento das vagens, com uso de calcário dolomítico saturado (T3), obteve-se uma média de 8,05 cm; com calcário dolomítico in natura (T2) foi alcançado um comprimento de 7,81 cm; no controle e com a aplicação de calcário dolomítico granulado (T4), obteve-se vagens de 7,62 e 7,31 cm, respectivamente.

Em relação ao número de grãos por vagem, em T1, T2 e T4 foi obtido 2 grãos. Enquanto no T3 obteve-se 1,80 grãos.

No solo argiloso, o número de vagens obtido no T2 foi 5,20; em T1 e T4 foi de 4,60 e no T3 resultou em 4 vagens. Quanto ao comprimento das vagens, o T2 apresentou um valor médio de 7,78 cm; em T3 obteve-se 7,46 cm; em T1 e T4 os

comprimentos obtidos foram de 7,39 e 7,32 cm, respectivamente.

Quanto ao número de grãos por vagem, no T2 e T3 obteve-se 3 grãos, no entanto, em T1 e T4, foram obtidos 2,20 e 2, respectivamente.

Segundo Casaccia (1991), o número médio de vagens por planta é de 6 e o comprimento é de 9 centímetros. Na presente investigação estes valores não foram alcançados, o que pode ser devido às limitações do plantio em vasos. É necessário ressaltar que o solo é um substrato físico, químico e biologicamente complexo (Taiz et al., 2015) e que diversos fatores afetam a disponibilidade de nutrientes. Nesse sentido, Mengel e Kirkby (1978) destacaram que depende, entre outros fatores, da concentração, da capacidade tampão e das condições de difusão no solo.

Garcia-Esteva et al. (2003), avaliaram a produtividade de grãos, seus componentes e biomassa em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em sistema hidropônico e em solo bem preparado, sem restrições de umidade e fertilidade. Eles mencionaram que no caso do cultivo em solo, possivelmente houve restrição para a exploração do sistema radicular, pois não há disponibilidade imediata de nutrientes como no sistema hidropônico, bem como a umidade e a aeração também poderiam ser fatores limitantes, diminuindo o rendimento de grãos. No que diz respeito ao fornecimento de nutrientes ao sistema radicular da cultura do solo, este é também um fator que está intimamente ligado à absorção de água, no entanto, a solução do solo é muito diluída e os nutrientes podem ser rapidamente esgotados pelas raízes se não forem liberados novos íons da fase sólida (Epstein, 1972; Salisbury e Ross, 1994); neste aspecto, a disponibilidade de nutrientes no solo é menor se comparada ao cultivo hidropônico.

Outros autores, avaliaram o comportamento agrônomico da cultura da fava com diferentes doses de fertilizantes orgânicos mais ácido húmico (AH) no setor Chipe Hamburgo, Cantón la Maná (Equador). As variáveis estudadas foram altura das plantas (m), dias para florescimento, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, peso de vagens (g), peso de 100 grãos frescos e secos (g), produtividade (kg/parcela) e análise econômica, onde foram avaliadas cinco plantas com diferentes tratamentos. Os resultados mostraram que o uso de húmus de minhoca obteve os melhores resultados nas variáveis avaliadas para crescimento, desenvolvimento e produção na cultura da fava. Em relação ao número de grãos por vagem, os autores não relataram diferenças significativas nos tratamentos com adubação orgânica, com valor de 3,33 para o controle e 3,35 para o húmus de minhoca + AH (Martinez e Yopez, 2022). O mencionado coincide com o exposto na

presente investigação, pois não houve diferença significativa quanto ao número de grãos/vagens nos dois tipos de solos estudados. Por sua parte, Rodríguez (1991) indica que o número de grãos por vagem pode ser determinado pelas condições nutricionais gerais da planta, ou pode ser devido à variabilidade genética da espécie e à aplicação de fertilizantes durante a formação da vagem.

Delgado et al. (2020), estudaram a fertilização de uma cultura de fava com composto de resíduo urbano (urbabono). O ensaio foi realizado em estufa utilizando vasos de 12 L nos quais foram incorporados dois tipos de solos, arenoso (92% areia) e argiloso (35% argiloso e 37% limo) com diferentes tratamentos: controle (sem qualquer tipo de adubação), adubação mineral (N-P-K) e adubação orgânica (urbabono). Os resultados obtidos no solo arenoso em termos de número de vagens por planta foram 4, 3 e 6 para o controle, mineral e urbabono, respectivamente. No solo argiloso os valores foram 5, 7 e 6 para os tratamentos citados. Por outro lado, o número de grãos/vagem obtidos no solo arenoso foi 3, para os diferentes tratamentos; enquanto no solo argiloso os valores foram 3, 2 e 3, respectivamente. Estes resultados correspondem aos obtidos na presente investigação, pois o número de grãos por vagem foi entre 2 e 3. Além disso, os maiores números de vagens foram obtidos no solo argiloso, em concordância com a pesquisa mencionada.

Quanto ao peso de 100 grãos, no solo arenoso obteve-se baixo peso para T4 (15,00 g) em comparação aos obtidos no T1, T2 e T3 do solo arenoso (24,80; 23,80 24,80 g, respectivamente). Os valores obtidos no T1 e T3 do solo arenoso e T3 do solo argiloso são semelhantes ao exposto por Gonçalves et al. (2019), que determinaram as propriedades físicas de grãos de feijão carioca plantado em campo. Quanto ao peso de 100 grãos, a média encontrada para os grãos avaliados foi de 24,9188 g. Por sua parte, Pinto (2016), estudou as propriedades físicas, químicas, nutricionais e tecnológicas de feijões de diferentes grupos de cor. As cultivares selecionadas para avaliação foram: Pérola e BRS Estilo (grupo comercial carioca), IPR Uirapuru e BRS Esteio (grupo comercial preto), e BRS Agreste e BRS Pitanga (grupo comercial especial). O cultivo foi realizado em junho de 2014, nos campos experimentais da Embrapa Arroz e Feijão, na fazenda Capivara, em Santo Antônio de Goiás (GO). Em relação ao resultado no peso de 100 grãos, o mesmo variou entre 19,38 e 25,28 g para IPR Uirapuru e Pérola, respectivamente. Marquezi (2013), encontrou resultados similares aos obtidos por Pinto. Para as cultivares BRS Pitanga, BRS Estilo e Pérola, provenientes de Ponta Grossa (PR), a autora encontrou 19,99; 26,47 e 28,42 g, respectivamente.

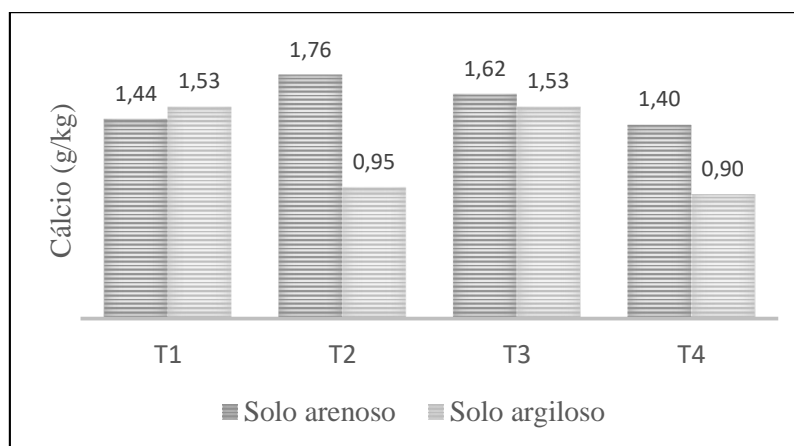
Salinas et al. (2023), cuja pesquisa teve como objetivo determinar as aplicações de fertilizantes químicos mais eficientes em termos de desenvolvimento e rendimento da cultura de feijão em uma área localizada no nordeste do Paraguai, constataram que o melhor valor para o peso de 100 grãos foi com o uso de NPK mais microelementos com 18,54 gramas. Evidenciando melhores resultados na presente investigação, com os valores obtidos em T1, T2 e T3 do solo arenoso e os diferentes tratamentos aplicados no solo argiloso, segundo o apresentado na Tabela 10.

Conforme Gonçalves et al. (2019), os grãos são classificados como: grãos pequenos (< 15g/100 grãos), médios (15,1 – 20 g/100 grãos), grandes (20,1 - 25 g/100 grãos) e muito grandes (> 25,1 g/100 grãos). Nesse sentido, os grãos avaliados no T4 do solo arenoso, são pequenos. Quanto aos demais tratamentos, apresentaram grãos classificados como grandes.

5.5. NUTRIENTES NO GRÃO DO FEIJÃO

A Figura 18 mostra o teor de cálcio (g/kg) encontrado no grão de feijão, em função dos diferentes tratamentos aplicados, tanto no solo arenoso quanto no solo argiloso.

Figura 18. Teor de Cálcio no grão de feijão.



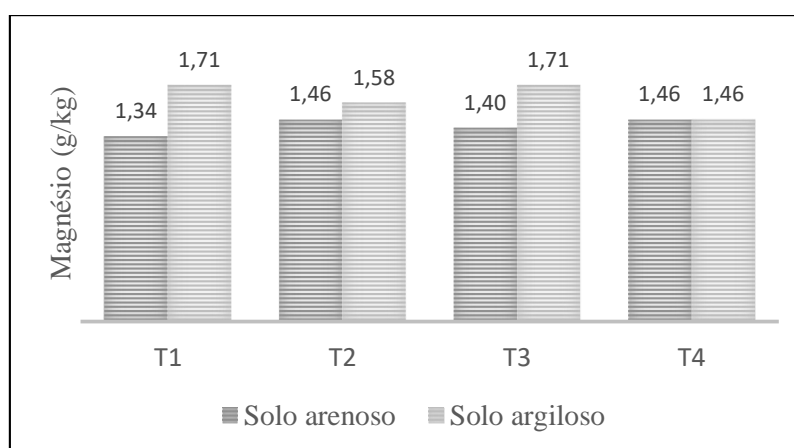
Fonte: Elaboração própria (2024).

Conforme observado na Figura 18, os maiores teores de cálcio ocorreram principalmente naqueles grãos que foram colhidos em solo arenoso, com destaque para os valores derivados de T2 e T3, sendo estes 1,76 e 1,62 g/kg, respectivamente. Esses resultados coincidem com os encontrados no período de incubação, uma vez que os maiores aumentos na concentração de cálcio no solo arenoso ocorreram no T2 (calcário dolomítico in natura) seguido do T3 (calcário dolomítico saturado), respectivamente. Em relação ao T1, a maior concentração ocorreu no solo argiloso, sendo o teor de 1,53 g/kg.

Smith et al. (2019), caracterizaram o impacto da seca na produtividade e na concentração de nutrientes nas folhas e no tecido da semente do feijoeiro comum cultivado no campo. Os nutrientes estudados foram: Ca, K, Mg, Fe, Na, P, S e Zn; concluindo que nenhum efeito negativo foi detectado na concentração de nutrientes na semente. A concentração de cálcio referenciada na pesquisa foi inferior a 0,5 mg/g (equivalente a <5 g/kg).

Na Figura 19 são apresentados os teores de magnésio (g/kg) encontrados no grão de feijão, em função dos diferentes tratamentos aplicados e da diferença na classe textural do solo.

Figura 19. Teor de Magnésio no grão de feijão.

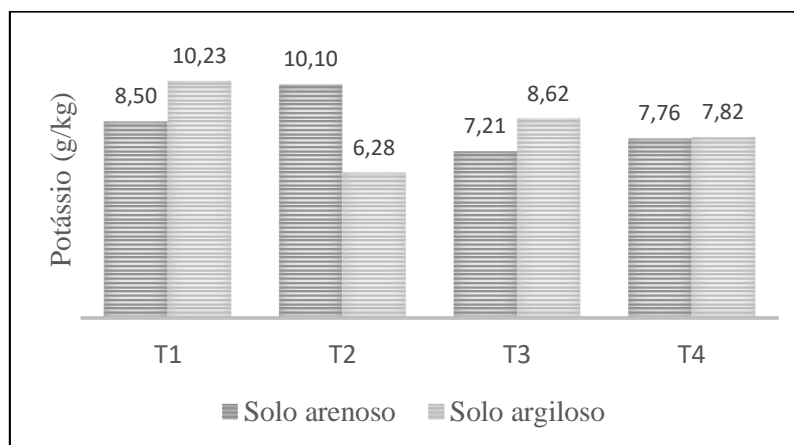


Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 19 observa-se que os maiores teores de magnésio foram obtidos nos grãos colhidos do solo argiloso, por terem mais Mg^{2+} trocável nas cargas. Os solos argilosos são bons em reter nutrientes. Isso ocorre porque a argila tem carga negativa, que por sua vez atrai cátions com carga positiva, como magnésio. A maior concentração desse elemento foi de 1,71 g/kg, valor obtido tanto no T1 quanto no T3. Considerando o período de incubação, os maiores teores na concentração de magnésio no solo argiloso ocorreram no T3 (calcário dolomítico saturado), durante os 90 dias de estudo; ficando demonstrado a coerência entre os resultados que estão sendo expostos.

Na pesquisa realizada por Smith et al. (2019), a concentração de magnésio referenciada foi inferior a 0,5 mg/g (equivalente a <5 g/kg).

A Figura 20 apresenta os teores de Potássio (g/kg) encontrados no grão de feijão, de acordo com os diferentes tratamentos aplicados e a diferença na classe textural do solo.

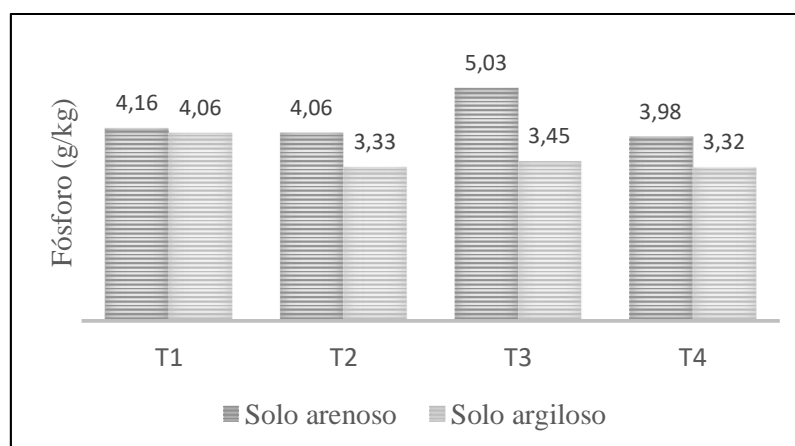
Figura 20. Teor de Potássio no grão de feijão.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 20 destaca-se que os maiores teores de potássio encontrados nos grãos ocorreram principalmente naqueles que foram colhidos em solo argiloso, sendo neste caso aqueles obtidos em T1, T3 e T4, respectivamente. Os teores foram 10,23; 8,62 e 7,82 g/kg para estes tratamentos. Quanto mais colóides, maior será a fertilidade, pois existe maior capacidade de armazenamento de nutrientes. Por isso, a fração argila é a que apresenta maior teor de potássio.

No T2 obteve-se maior teor de potássio nos grãos obtidos do solo arenoso, atingindo 10,10 g/kg deste nutriente. A concentração de potássio referenciada por Smith et al. (2019) foi de 3 mg/g (equivalente a 3 g/kg), sendo maiores os teores obtidos no presente estudo.

Na Figura 21 são apresentados os teores de fósforo (g/kg) encontrados no grão de feijão, em função dos diferentes tratamentos aplicados e da diferença na classe textural do solo.

Figura 21. Teor de Fósforo no grão de feijão.

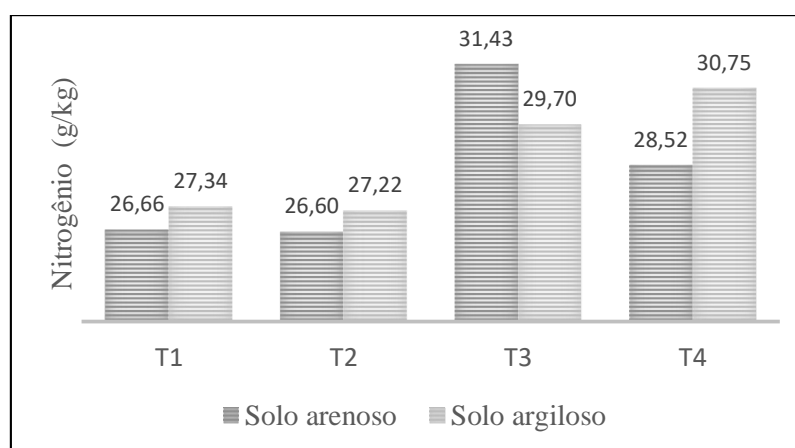
Fonte: Elaboração própria (2024).

A Figura 21 destaca os resultados obtidos no solo arenoso, onde foram alcançados maiores teores de fósforo nos grãos. O maior valor obtido foi de 5,03 g/kg, resultante do T3 (calcário dolomítico saturado). Esse resultado coincide com o obtido no desempenho agrônômico, destacando o peso de 100 grãos nesse tratamento. Demonstrando que o P aumenta sua disponibilidade a pH maior que 5,5.

Considerando o que foi investigado por Smith et al. (2019), a concentração de fósforo referenciada foi de 3 mg/g (equivalente a 3 g/kg).

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos quanto ao teor de nitrogênio nos grãos, em função dos tratamentos aplicados e da diferença de classe textural do solo.

Figura 22. Teor de Nitrogênio no grão de feijão.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 22 destaca-se o teor de nitrogênio obtido no grão colhido do T3 (calcário dolomítico saturado), correspondente ao solo arenoso, com valor de 31,43 g/kg. O resultado está relacionado ao obtido acima, pois existe uma relação direta entre a absorção de fósforo e nitrogênio. Quanto maior a quantidade de N, maior será a absorção de P pelas plantas, pois a solubilidade do P aumenta.

Delgado et al. (2020), que estudaram a adubação de uma cultura de feijão com composto de resíduo urbano (urbabono), obtiveram 3,66 e 3,71% de nitrogênio no grão colhido em solo arenoso e argiloso, respectivamente. Nesse sentido, os resultados obtidos na presente investigação e na referência citada são semelhantes, considerando que a concentração de nitrogênio no grão encontra-se na faixa de 3%.

Outros autores avaliaram a aplicação de vermicomposto de cinzas de biomassa com biorresíduos para solubilização de nutrientes e seu efeito na fixação de nitrogênio em feijoeiro comum (Güldane et al., 2021). Quanto à composição elementar da folha do feijoeiro adubada com doses crescentes de vermicomposto, foram observadas

variações no tecido foliar em resposta ao tratamento com nitrogênio, fósforo, enxofre, ferro e zinco. O vermicomposto aumentou significativamente as concentrações de N, Fe e Zn em relação ao controle. Observaram também que N, P, Fe e Mn no tecido foliar foram encontrados abaixo da faixa de suficiência estabelecida por Mesquita et al. (2018). Além disso, todas as concentrações foliares foram medidas enquanto os nutrientes estavam dentro da faixa relatada na literatura para a cultura do feijão (Smith et al., 2019).

Considerando os elementos estudados na presente investigação, os maiores teores encontrados por Güldane et al. (2021) foram: N ($44,9 \pm 0,6$ g/kg), P ($4,2 \pm 0,3$ g/kg), K ($26,8 \pm 1,0$ g/kg), Ca ($13,8 \pm 0,2$ g/kg) e Mg ($4,8 \pm 0,1$ g/kg). Por outro lado, as faixas de suficiência para estes elementos são as seguintes: N (58,63-62,32 g/kg), P (4,93-5,52 g/kg), K (24,80-28,05 g/kg), Ca (13,07 -14,35g/kg) e Mg (4,67-5,31g/kg). Nesse sentido, os teores de nutrientes nos grãos colhidos na presente investigação são classificados como baixos em termos de nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Os teores de fósforo obtidos nos diferentes tratamentos são em sua maioria baixos, exceto o obtido no T3 (calcário dolomítico saturado) do solo arenoso, pois o teor obtido é classificado como suficiente (Mesquita et al., 2018). Os teores de cálcio encontrados no solo arenoso ao final do período de incubação foram classificados como baixos, o que explica a baixa absorção de Ca nos grãos de feijão.

5.6. PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO APÓS A COLHEITA DO FEIJÃO

A Figura 23 apresenta os níveis de pH, alumínio, cálcio, magnésio e fósforo nos solos arenosos e argilosos, após a colheita do feijão, especificamente, 130 dias após ter sido realizada a primeira adubação química. Os parâmetros avaliados são comparados com os níveis iniciais para verificar o comportamento das referidas propriedades, de acordo com os tratamentos aplicados.

A Figura 23a mostra que o nível inicial de pH no solo arenoso era 4,55, aumentando esse valor para 6,70 e 6,53 nos tratamentos T2 e T3, respectivamente. Destacando que estes valores aumentaram ainda mais após 90 dias de estudo (correspondente ao período de incubação); cujos níveis no referido período foram 6,42 e 6,06, respectivamente. Considerando os valores mencionados para T2 e T3 e segundo Oleynik et al. (1998 apud Meneghetti 2018, p. 62), a acidez é classificada como muito baixa e baixa, respectivamente.

Na mesma figura observa-se que no caso do solo argiloso houve a mesma tendência em relação ao aumento do pH; o valor inicial foi de 5,00, aumentando para 5,51 e

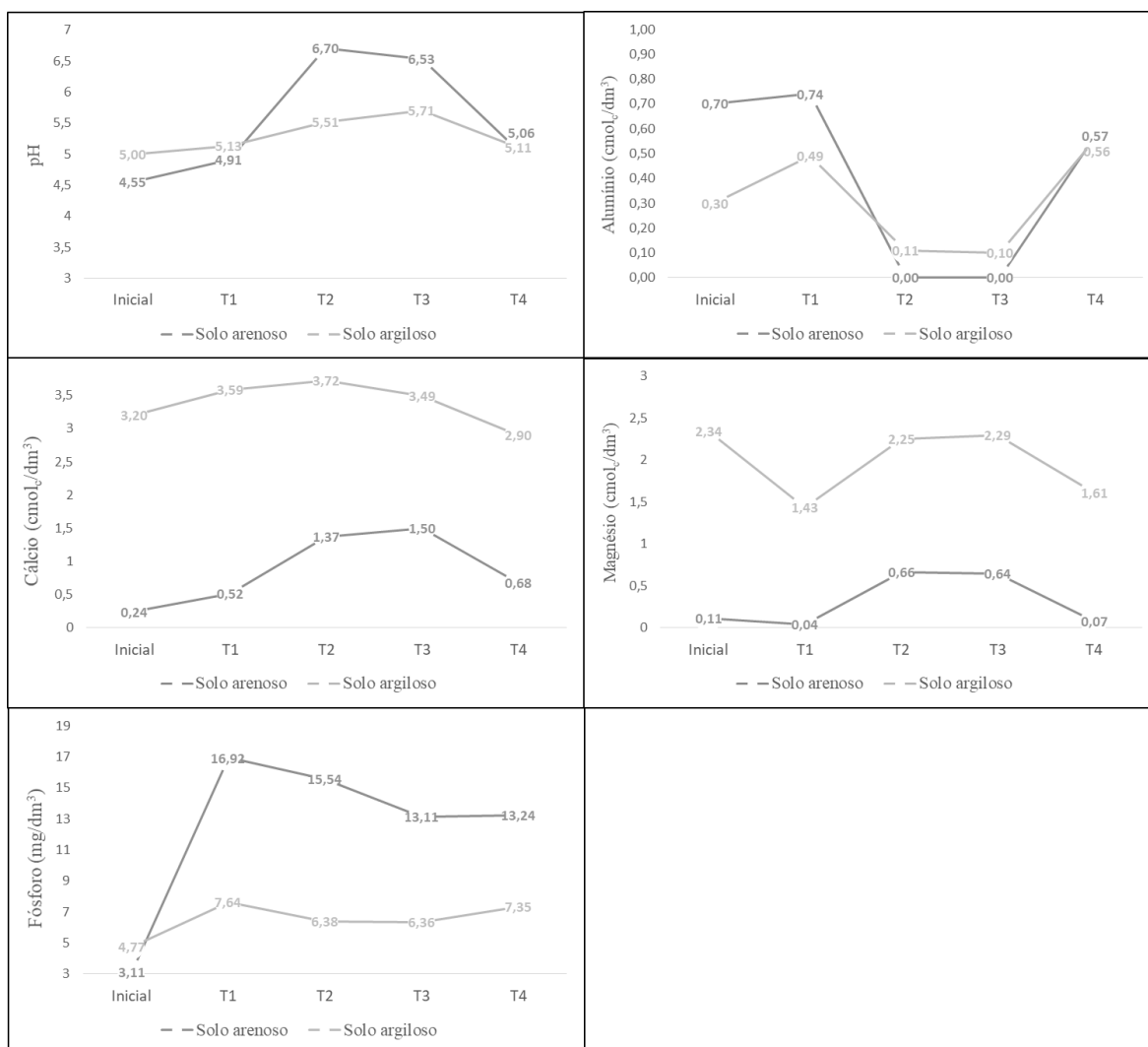
5,71 para T2 e T3, respectivamente. Nesse sentido, corrobora-se a mesma tendência alcançada no período de incubação, pois o nível mais alto de pH foi obtido com T3, sendo a acidez média, conforme Oleynik et al. (1998 apud Meneghetti 2018, p. 62).

Isto confirma que independentemente do tempo, esta propriedade tende a melhorar com os corretivos utilizados. Em concordância, Amaral e Costa (2015) avaliaram os efeitos da aplicação superficial de calcário dolomítico e silicatos nos atributos químicos do solo, bem como na nutrição e produtividade de grãos de soja e milho quando essas culturas são cultivadas em rotação com adubação verde. A aplicação de calcário dolomítico e silicato aumentou o pH do solo até 6 meses após a aplicação.

A Figura 23b detalha que os teores de alumínio tanto em solos arenosos quanto argilosos seguem a mesma tendência, pois em T1 e T4 os valores aumentaram em comparação ao valor inicial e o nível exposto aos 90 dias do período de incubação; no entanto, em T2 e T3 do solo arenoso, o alumínio não foi detectado analiticamente. Segundo referência, os níveis de Al^{3+} são eficientemente reduzidos 18 meses após a aplicação de calcário dolomítico e silicatos (Amaral e Costa, 2015).

De acordo com a escala de classificação de Alvarez et al. (1999) e Lima et al. (1989) apud Meneghetti (2018), os níveis de alumínio resultantes do T2 e T3 em solo arenoso são considerados não tóxicos; o teor de alumínio do T2 ($0,11 \text{ cmol/dm}^3$) em solo argiloso é pouco tóxico, enquanto o T3 ($0,10 \text{ cmol/dm}^3$) é considerado não tóxico. O aumento nos teores de Al, poderia atribuir-se a fertilização química aplicada nos diferentes tratamentos. Em uma pesquisa, compararam diferentes adubos orgânicos com a adubação mineral do maracujazeiro-amarelo quanto aos efeitos sobre as características químicas e físicas do solo adubado. Quanto ao teor de Al no solo, observaram que os tratamentos adubados com fertilizante mineral apresentaram valores muito superiores aos encontrados nos adubados com compostos orgânicos (Assis Pires et al., 2008).

Figura 23. (a) pH do solo, (b) Alumínio ($\text{cmol}_e/\text{dm}^3$), (c) Cálcio ($\text{cmol}_e/\text{dm}^3$), (d) Magnésio ($\text{cmol}_e/\text{dm}^3$) e (e) Fósforo (mg/dm^3) nos tratamentos: T1 (controle), T2 (calcário dolomítico in natura), T3 (calcário dolomítico saturado) e T4 (calcário dolomítico granulado), após a colheita do feijão.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Em relação ao teor de cálcio, a Figura 23c mostra que no solo arenoso, o nível inicial de $0,24 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$ aumenta para $0,52$; $1,37$; $1,50$ e $0,68$ para $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$ para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Nesse sentido, os valores obtidos em T3 e T4 são ainda maiores, considerando os valores alcançados aos 90 dias do período de incubação, que foram de $1,32$ e $0,35 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$ para os referidos tratamentos. Mesmo assim, considerando os valores encontrados nesta seção, os níveis de cálcio são classificados como baixos (Da Silva, 2009).

Na mesma figura pode-se observar que no solo argiloso o teor inicial de cálcio aumentou em T1, T2 e T3, sendo os valores para estes $3,59$; $3,72$ e $3,49 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$. Os valores encontrados são semelhantes aos obtidos após 90 dias do período de incubação,

cujos valores foram 3,32; 3,80 e 4,03 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, respectivamente. Os níveis de cálcio expostos são classificados como médios (Costa e Oliveira, 2001 apud Meneghetti, 2018; Da Silva, 2009). Por ser um corretivo que reage lentamente no solo, o calcário dolomítico mantém efeito residual prolongado (Espinosa e Molina, 1999).

Em relação ao magnésio, a Figura 23d mostra que o teor segue a mesma tendência tanto em solos arenosos como argilosos, pois há uma ligeira diminuição deste nutriente em T1 e T4, enquanto os valores resultantes para T2 e T3 são semelhantes para cada tipo de solo. Os teores de Mg obtidos no solo arenoso são classificados como muito baixos (em T1 e T4) e médios (em T2 e T3); enquanto os teores obtidos no solo argiloso são considerados altos (Da Silva, 2009). Considerando o período de incubação, houve uma ligeira diminuição nos níveis alcançados aos 90 dias de estudo. Não obstante, os níveis de Mg começaram a diminuir em T2 após 60 dias e em T3 após 30 dias de incubação no solo arenoso. No solo argiloso, os teores começaram a reduzir após 30 dias de incubação. Conforme Espinosa e Molina (1999), os corretivos portadores de Mg são eficazes na correção de deficiências, mas geralmente não deixam efeito residual prolongado no solo, pois são sais minerais altamente solúveis que são aplicados em doses relativamente moderadas. Além disso, os latossolos têm pouca capacidade de reter os nutrientes que as plantas precisam, como o potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg).

A lixiviação de Mg pode estar relacionada à formação de pares de íons inorgânicos com NO_3^- , HCO_3^- , OH^- , Cl^- e SO_4^{2-} provenientes da fertilização mineral (Crusciol et al., 2011). Além disso, pode haver mobilidade de Ca e Mg através de canais radiculares, microcanais biológicos (bioporos) e planos de fraqueza em solos de baixa mobilidade sob plantio direto (Castro, Calonego e Crusciol, 2011).

Na Figura 23e observa-se que os maiores teores de fósforo foram obtidos no T1, sendo 16,92 e 7,64 mg/dm^3 , para o solo arenoso e solo argiloso, respectivamente.

Segundo a literatura, quanto mais arenoso é o solo menor é a quantidade de fósforo nestes solos (Klein, 2014) pois apresentam em média 70% de sua composição teores de areia, o que os tornam altamente permeáveis, com baixa capacidade de retenção de água, baixos teores de matéria orgânica e adsorção de íons. Esta referência difere do encontrado na presente investigação, já que na figura sobressai a reação do fósforo no solo arenoso. As concentrações desse nutriente obtidas após a colheita do feijão são classificadas como muito alta em solo arenoso e alta em solo argiloso (Costa e Oliveira, 2001 apud Meneghetti, 2018; Da Silva, 2009).

6. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de adsorção de nutrientes presentes no efluente hidropônico com uso de calcário dolomítico, verificou-se que o adsorvente retém fósforo, manganês, cálcio e zinco, respectivamente. As porcentagens de remoção de nutrientes obtidas foram: 74,45% de P; 66,56% de Mn; 19,75% de Ca e 13,09% de Zn.

Com relação a caracterização, no espectro FTIR do calcário dolomítico in natura, foram observadas as bandas que indicam a presença do grupo CO_3^{2-} . Após a adsorção dos nutrientes, observou-se uma diminuição na intensidade das bandas; a tendência dessa mudança indica interação entre os grupos de superfície presentes no calcário dolomítico com os nutrientes.

Os difratogramas de raios-X confirmam a presença majoritária de carbonatos de cálcio e magnésio nas amostras analisadas; no calcário dolomítico saturado foi observada aumento de grupos carbonatos, devido à adsorção do cálcio do efluente hidropônico.

Nas micrografias obtidas por MEV-EDS do calcário dolomítico in natura, foram observados aglomerados irregulares relativamente grandes. Após a adsorção de nutrientes, a superfície exibiu aspecto “lamacento” com a presença de bordas afiladas. O espectro EDS correspondente à amostra do calcário dolomítico in natura revelou que sua composição elementar em ordem proporcional é $\text{O} > \text{Ca} > \text{C} > \text{Mg} > \text{Si}$. No espectro obtido para a amostra de calcário dolomítico saturado com nutrientes, observou-se a mesma composição.

O calcário dolomítico in natura contém 37,84% de CaO, com PN de 97,59% e PRNT de 86,71%. Após a adsorção, a calcário dolomítico saturado apresentou 38,74% de CaO, com PN de 99,92% e PRNT 90,64%; aumentando também a porcentagem de reatividade.

Segundo os resultados das análises realizadas nos dois tipos de solos a tratar, o nível de acidez (pH medido em água) do solo argiloso e arenoso corresponde a alto e muito alto, respectivamente. Os dois tipos de solos apresentaram médio teor de fósforo. Em relação aos cátions básicos cálcio, magnésio e potássio, em solos argilosos apresentaram teores médio, alto e muito alto, respectivamente; enquanto no arenoso apresentaram teores baixo, muito baixo e baixo, na ordem dada. O alumínio apresentou concentrações tóxicas nos solos analisados.

Com relação ao efeito dos corretivos durante o período de incubação sobre as propriedades químicas do solo arenoso, o pH aumentou até os 90 dias, nos tratamentos

T2 e T3. Enquanto ao alumínio no T2 e T3 a concentração deste parâmetro diminuiu de acordo com o aumento do pH, até não ser detectado analiticamente aos 60 dias. Aos 60 dias foi atingido o maior teor de cálcio e magnésio no T2; conforme o aumento de pH, os maiores teores de fósforo foram evidenciados aos 60 dias para T2 e T3.

Com relação ao efeito dos corretivos sobre as propriedades químicas do solo argiloso, o pH, Al, Ca e Mg reagiram rapidamente aos 30 dias de estudo em T2 e T3. Os valores mais altos tanto de Ca como Mg foram expostos no T3. Os maiores teores de fósforo foram evidenciados aos 60 dias.

Quanto aos parâmetros de desempenho agrônômico do feijão, os resultados nos dois tipos de solo, tanto nos tratamentos como no controle, não apresentaram diferenças estatísticas significativas em termos de número de vagens, comprimento de vagens e número de grãos por vagens, excetuando o peso de 100 grãos obtido no solo arenoso, pois os dados de T1, T2 e T3 diferiram significativamente do dado de T4.

No que diz respeito aos nutrientes absorvidos pelos grãos do feijão, os maiores teores de cálcio, fósforo e nitrogênio ocorreram principalmente naqueles grãos que foram colhidos em solo arenoso. Com relação ao magnésio e potássio, os teores mais elevados foram obtidos nos grãos colhidos do solo argiloso. Destacaram-se os valores derivados de T3.

Após a colheita do feijão, os resultados da análise de propriedades químicas indicaram que os níveis de pH e teores de cálcio em solos arenosos e argilosos aumentaram ainda mais em comparação aos teores expostos no período de incubação. Os níveis de alumínio resultantes no T3 nos dois tipos de solo, são considerados como não tóxico para as plantas. Em relação ao magnésio, apresentou redução de seus teores nos diferentes tratamentos, tendência já exposta durante o período de incubação. Os maiores teores de fósforo foram obtidos no T1 para os dois tipos de solos.

O calcário dolomítico saturado por nutrientes do efluente hidropônico (T3) apresentou boa afinidade com os dois tipos de solo trabalhados, destacando-se sua qualidade de melhorar as propriedades químicas do solo e disponibilizar os nutrientes para as plantas, fazendo com que tenham bom desenvolvimento considerando os parâmetros de desempenho agrônômico estudado e a absorção de nutrientes mostrados nos grãos de feijão, principalmente de fósforo. Os resultados demonstram a possibilidade de utilização do calcário dolomítico para remover nutrientes do efluente hidropônico e transformá-lo em recurso através da reutilização eficiente como corretivo e fertilizante de solos agrícolas.

7. RECOMENDAÇÕES

- Realizar testes de campo, visando estimar a resposta da calcário dolomítico saturado no aumento do desempenho agrônômico das culturas.
- Determinar a dose ideal de calcário dolomítico saturado em solo arenoso e argiloso. Acompanhado de uma análise econômica.
- Incorporar calcário dolomítico saturado no hidrogel e realizar testes de condicionamento, principalmente em solos arenosos, pois esse tipo de solo tende a perder umidade rapidamente.

8. REFERÊNCIAS

ACHARYA, B. **Chapter 10 - Cleaning of Product Gas of Gasification**, Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, p. 373-391. 2018.

ADIBI, N.; LAFHAJ, Z.; YEHYA, M.; PAYET, J. Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1517-1528, 2017.

ADLER, P.R.; HARPER, J.K.; TAKEDA, F.; WADE, E.M.; SUMMERFELT, S.T., Economic evaluation of hydroponics and other treatment options for phosphorus removal in aquaculture effluent. **Hortscience**, v. 35 (6), p. 993-999, 2000.

ALBADARIN, A.B.; MANGWANDI, C.; ALA'A, H.; WALKER, G.M.; ALLEN, S.J.; AHMAD, M.N. Kinetic and thermodynamics of chromium ions adsorption onto low-cost dolomite adsorbent, **Chem. Eng. J.**, v. 179, p. 193-202. 2012.

ALCARDE, J.C. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA, 1992.

ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Avaliação química de corretivos de acidez para fins agrícolas: uma nova proposição. **Scientia Agrícola**, v. 53, p.211-216, 1996.

AMARAL CASTRO, G.; COSTA CRUSCIOL, C. Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in rotation with green manure in a tropical region. *Bragantia*, Campinas, v. 74, p. 311-321, 2015.

AN, Q.; LI, Z.; ZHOU, Y.; MENG, F.; ZHAO, B.; MIAO, Y.; DENG, S. Ammonium removal from groundwater using peanut shell based modified biochar: Mechanism analysis and column experiments, **Journal of Water Process Engineering**, v. 43, 102219, 2021.

APHA (American Public Health Association); AWWA (American Water Works Association); WEF (Water Environment Federation). **Standard Methods for the Examination of Waters and Wastewaters**, Rice, E.W., Baird, R., Eaton, A., Clesceri, L. (Editors), 23rd Ed. American Public Health Association, Washington, 2017.

ASSIS PIRES, A.; HENRIQUE MONNERAT, P.; MARCIANO, C.R.; DA ROCHA PINHO, L.; DARÉ ZAMPIROLI, P.; CASTRO CARRIELLO ROSA, R.; ALMEIDA MUNIZ, R. Efeito da adubação alternativa do maracujazeiro amarelo nas características químicas e físicas do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 1997-2005, 2008.

AZNAR-SÁNCHEZ, J.A.; VELASCO-MUÑOZ, J.F.; GARCÍA-ARCA, D.; LÓPEZ-FELICES, B. Identification of opportunities for applying the circular economy to intensive agriculture in Almería (South-East Spain). **Agronomy**, v. 10, p. 25, 2020.

BACELO, H.; PINTOR, M.A.; SANTOS, S.C.R.; BOAVENTURA R.A.R.; BOTELHO, C.M.S. Performance and prospects of different adsorbents for phosphorus uptake and recovery from water. **Chemical Engineering Journal**, v. 381, p. 18, 2020.

BANAITÉ, D. Towards circular economy: analysis of indicators in the context of sustainable development. **Social Transformations in Contemporary Society**, v. 6, p. 142-150, 2016.

BANCO MUNDIAL. El agua en la agricultura. Disponível em: <<https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture> >. Acesso em: 04 abril de 2024, 2022.

BATISTA, M.A.; INOUE, T.T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A.S. **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral**. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T.; FREITAS, P.S.L.; BERIAN, L.O.S.; GOTO, R., comps. Hortaliças-fruto [online]. Maringá: EDUEM, p. 113-162, 2018.

BELLINGIERI, P.; ALCARDE, J.C.; SOUZA, E. Eficiência relativa de diferentes frações granulométricas de calcários na neutralização da acidez dos solos, avaliada em laboratório. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 46(2), p. 303-317, 1989.

BELTRANO, J.; GIMENEZ, D.O. **Cultivo en hidroponía**. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), p. 191, 2015.

BERNIER, R.; ALFARO, M. **Acidez de los Suelos y Efectos del Encalado**. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Osorno, Chile. Boletín INIA N° 151, p. 46, 2006.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Agricultura: opção animadora para a utilização de lodo de esgoto. **O Agrônomo**, São Paulo, n. 52, p. 13-16, 2000.

BOEYKENS, S.P.; PIOL, M.N.; SAMUDIO LEGAL, L.; SARALEGUI, A.B.; VÁZQUEZ, C. Eutrophication decrease: phosphate adsorption processes in presence of nitrates. **J. Environ. Manag.** v. 203, p. 888-895, 2017.

BORRELLO M.; CARACCILO F.; LOMBARDI A.; PASCUCCHI S.; CEMBALO L. Consumers perspective on circular economy strategy for reducing food waste. **Sustainability**, v. 9, p. 18, 2017.

BRASIL. Instrução Normativa N° 35, de 04 de julho de 2006. Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados a agricultura D.O.U., 12/07/2006 - Seção 1. 2006.

BRUDVIG, L.A.; DAMSCHEN, E.I.; TEWKSBURY, J.J.; HADDAD, N.M.; LEVEY, D.J., Landscape connectivity promotes plant biodiversity spillover into non-target habitats. **Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.** 106 (23), p. 9328-9332, 2009.

CALVA, C.; ESPINOZA, J. Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. Siembra: Universidad Central del Ecuador, Ecuador. v. 4, p. 11, 2017.

CANO-BETANCUR, S.M.; GALLEGU-BECERRA, M.; CHAVARRIAGA-MONTOYA, W. Efecto de la aplicación de calcio y fósforo en un suelo ácido y la respuesta en el cultivo de tomate chonto (*Solanum lycopersicum* (L.) Mill). **Agron**, v. 19(1), p. 77-87, 2011.

CARBALLA, M.; MOERMAN, W.; DE WINDT, W.; GROOTAERD, H.; VERSTRAETE, W. Strategies to optimize phosphate removal from industrial anaerobic effluents by magnesium ammonium phosphate (MAP) production. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 84, p. 63-68, 2009.

CASACCIA, R. **Cultivo de la habilla**. Dirección de Investigación Agraria, Ministerio de Agricultura y Ganadería. Asunción, Paraguay, p. 12 (Boletín de Divulgación, nº 32), 1991.

CASTELLAN, W. **Fisicoquímica**. Editorial Addison Wesley Longman, 2º edición. México, D.F. p. 452-459, 1987.

CASTRO, G.S.A.; CALONEGO, J.C.; CRUSCIOL, C.A.C. Propriedades físicas do solo em sistemas de rotação de culturas conforme o uso de corretivos da acidez. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, p. 1690-1698, 2011.

CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, v. 195-196, p. 234-242, 2013.

CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C.; CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Management Impacts on Soil Organic Matter of Tropical Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 14, p. 8, 2015.

CASTRO, H.; GÓMEZ, M. Actualidad y tendencias del uso de enmiendas calcáreas en Colombia. Actualización en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes. Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá. **Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo**. Bogotá. p. 141-153, 2008.

CATANI, R.A.; GALLO, J.R. Avaliação da Exigência em Calcário dos Solos do Estado de São Paulo, Mediante Correlação entre o pH e a Porcentagem da Saturação de Bases, **Revista de Agricultura**, Piracicaba, SP. v. 30, p. 49-60, 1955.

CAVALCANTI, L. F.; OLIVEIRA, F. M. C.; MELO, E. B.; FERNANDES, A. C. Identificação dos minerais do granito azul sucuru através da técnica da Difração de Raios X. **HOLOS**, v. 7, p. 32-39, 2016.

CHANG, J.; MA, L.; CHEN, J.; LU, Y.; WANG, X. Greenhouse wastewater treatment by baffled subsurface-flow constructed wetlands supplemented with flower straws as carbon source in different modes. **Environ. Sci. Pollut. Control Ser.** v. 24 (2), p. 1578-1587, 2017.

COOPER, D.; GUTOWSKI, T. The Environmental Impacts of Reuse: A Review. **Journal of Industrial Ecology**, Yale University, v. 21(1), p. 38-56, 2017.

CRUSCIOL, C.A.C.; GARCIA, R.A.; CASTRO, G.S.A.; ROSOLEM, C.A. Nitrate role in basic cation leaching under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1975-1984, 2011.

CRUZADO MEDINA, DEYGAR LUIS. Efecto de la aplicación de enmiendas de origen mineral en el pH del suelo en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), distrito de Pólvara - Tocache - San Martín. Tarapoto - Perú, p. 67, 2017.

CRUZ-OLIVARES, J.; PÉREZ-ALONSO, C.; BARRERA-DÍAZ, C.; NATIVIDAD, R.; CHAPARRO-MERCADO, M.C. Thermodynamical and analytical evidence of lead ions chemisorptions onto Pimentadioica. **Chemical Engineering Journal**, v. 166, p. 814-821, 2011.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction**, 2 ed. London: Addison-Wesley Publishing Company, p. 555, 1978.

DA SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**/editor técnico, Fábio Cesar da Silva. -2.ed.rev.ampl.- Brasília,DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 627, 2009.

DABROWSKI, A. Adsorption from theory to Practice. **Adv. Colloid Interface**. v. 93, p. 135-224, 2001.

DE PASCALE, A.; ARBOLINO, R.; SZOPIK-DEPCZYŃSKA, K.; LIMOSANI, M.; IOPOLO, G. A systematic review for measuring circular economy: the 61 indicators. **J Clean Prod**. A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 281,124942, 2021.

DELGADO, M.M.; ÁLVAREZ, C.; MARTÍNEZ, S.; GABRIEL, J.L. Fertilización de un cultivo de haba con compost procedente de residuos urbanos: Urbabono. 2020. Disponível em: <https://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/316251-Fertilizacion-de-un-cultivo-de-haba-con-compost-procedente-de-residuos-urbanos-Urbabono.html>

DEUS, A.C.; BÜLL, L.; CORRÊA J.; BOAS, R. Determination of reactivity rates of silicate particle-size fractions. **Revista Ceres**, v. 61(2), p. 265-272, 2014.

DIAS, V.P.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, 2006.

DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO MINERO, Coordinación General de Minería. Perfil de Mercado de la Dolomita, p. 51, 2013.

DIWAN, V.; SAR, S.K.; BISWAS, S.; LALWANI, R. Adsorptive extraction of uranium (VI) from aqueous phase by dolomite, **Groundwater.Sustain.**, v. 11, p. 100424, 2020.

DUARTE, L.; JUCHEM, P.L.; PULZ, G.M.; DE BRUM, T.M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A.; BONATTO, R. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, v. 30 (2), p. 3-15, 2003.

EMAMI, A.; RAHBAR-KELISHAMI, A. Zinc and nickel adsorption onto a low-cost mineral adsorbent: kinetic, isotherm, and thermodynamic studies, **Desalination Water Treat.**, v. 57, p. 21881-21892. 2016.

EPSTEIN, E. **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. J. Wiley and Sons, Inc., New York, p. 68-82, 1972.

ESPINOSA, J.; MOLINA, E. **Acidez y encalado de los suelos**. International Plant Nutrition Institute IPNI. Primera Edición, Quito, EC., p. 49, 1999.

FAGERIA, N.; BALIGAR, V. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. In D. Sparks (Ed.), **Advances in Agronomy**, London, v. 99, p. 345-399, 2008.

BANCO MUNDIAL. El agua en la agricultura. Disponible em: <<https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

FENG, Q.; CHEN, M.; WU, P.; ZHANG, X.; WANG, S.; YU, Z.; WANG, B. Simultaneous reclaiming phosphate and ammonium from aqueous solutions by calcium alginate-biochar composite: Sorption performance and governing mechanisms, **Chemical Engineering Journal**, v. 429, p. 132166, 2022.

FIA, R.; MATOS, A.; AGUIRRE, C. Características Químicas de Solo Adubado com Doses Crescentes de Lodo de Esgoto Caleado. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, p. 297-99, 2005.

GAGNON, V.; MALTAIS-LANDRY, G.; PUIGAGUT, J.; CHAZARENCO, F.; BRISSON, J. Treatment of hydroponics wastewater using constructed wetlands in winter conditions. **Water Air Soil Pollut.** v. 212, p. 483-490, 2010.

GALLUCCI, K.; PAOLINI F.; FELICE, L.D.; COURSON, C.; FOSCOLO, P.U.; KIENNEMANN, A. SEM analysis application to study CO₂ capture by means of dolomite. **Diffus. Fundam**, v. 7(5), p. 1-11, 2007.

GARCÍA-ESTEVA, A.; KOHASHI-SHIBATA, J.; BACA-CASTILLO, G.A.; ESCALANTE-ESTRADA, J.A.S. Rendimiento y asignación de materia seca de una variedad de frijol en un sistema hidropónico y suelo **Terra Latinoamericana**, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México, v. 21, p. 471-480 2003.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N.M.P.; HULTINK, E.J. Circular Economy Sustainability Paradigm. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, n. June, p. 757-768, 2017.

GODOY, L.C. A logística na destinação do lodo de esgoto. *Revista Científica On-line*, São Paulo, v. 2, p. 12, 2013.

GONÇALVES, B.C.; MOTA, D.C.D.; OLIVEIRA, C. M.; MONTALVÃO, M.L.; SANTOS, A.F.S.; LOPES, E.F. Propriedades físicas de grãos de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*). In **A produção do Conhecimento nas Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 5, p. 24-28, 2019.

DURÁN-ROMERO, G.; LÓPEZ, A.M.; BELIAEVA, T.; FERASSO, M.; GARONNE, C.; JONES, P. Bridging the gap between circular economy and climate change mitigation policies through eco-innovations and Quintuple Helix Model. **Technol Forecast Soc Chang.** v. 160, 120246, 2020.

GÜLDANE ASLI TURP; SINAN MEHMET TURP; SAIM OZDEMIR; KAAAN

YETILMEZSOY. Vermicomposting of biomass ash with bio-waste for solubilizing nutrients and its effect on nitrogen fixation in common beans. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 12, 2021.

HADDAD, K.; JELLALI, S.; JEGUIRIM, M.; TRABELSI, A.B.H.; LIMOUSY, L. Investigations on phosphorus recovery from aqueous solutions by biochars derived from magnesium-pretreated cypress sawdust, **J. Environ. Manage.** v. 216, p. 305-314, 2018.

HAN, R.; ZOU, L.; ZHAO, X.; XU, Y.; XU, F.; LI, Y.; WANG, Y. Characterization and properties of iron oxide-coated zeolite as adsorbent for removal of copper(II) from solution in fixed bed column. **Chem. Eng. J.** v. 149, p. 123-131, 2009.

HEWLETT, P.; LISKA, M. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 5th Edition, Butterworth Heinemann, 2019.

HU, Y.; DU, Y.; NIE, G.Z.; ZHU, T.J.; DING, Z.H.; WANG, H.L.; ZHANG, L.; XU, Y.B. Selective and efficient sequestration of phosphate from waters using reusable nano-Zr (IV) oxide impregnated agricultural residue anion exchanger. **Sci. Total Environ.**, v. 700, p. 134999, 2020.

HUANG, W.Y.; ZHU, Y.; TANG, J.P.; YU, X.; WANG, X.L.; LI, D.; ZHANG, Y.M. Lanthanum-doped ordered mesoporous hollow silica spheres as novel adsorbents for efficient phosphate removal. **J. Mater. Chem.** v. 2, p. 8839-8848, 2014.

INFERHUILA.NET. Información Técnica Dolomita. 2015. Disponible em: http://www.inferhuila.net/inferhuila/index.php?page=shop.product_detailsandcategory_id=6andflypage=flypage.tplandproduct_id=55andoption=com_virtuemartandItemid=54

JACQUEMYN, C.; HUYSMANS, M.; HUNT, D.; CASINI, G.; SWENNEN, R. Multi-scale threedimensional distribution of fracture- and igneous intrusion- controlled hydrothermal dolomite from digital outcrop model, Latemar platform, Dolomites, northern Italy. **AAPG Bull.**, v. 99, p. 957-984, 2015.

JI, J.; GE, Y.; BALSAM, W.; DAMUTH, J.E.; CHEN, J. Rapid identification of dolomite using a Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR): A fast method for identifying Heinrich events in IODP Site U1308. **Marine Geology**, v. 258, p. 60-68, 2009.

KASS, D. Fertilidad de Suelos. Editorial EUNED, San José, Costa Rica. 272 p, 1996.

KHOSHRAFTAR, Z.; MASOUMI, H.; GHAEMI, A. An insight into the potential of dolomite powder as a sorbent in the elimination of heavy metals: A review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**. v. 7, p. 21, 2023.

KINRAID, T. B. Identity of the rhizotoxic aluminum species. **Plant Soil, The Hague**, v. 134, p. 167-178. 1991.

KIZITO, S.; LUO, H.; LU, J.; BAH, H.; DONG, R.; WU, S. Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: Exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, p. 22, 2019.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Ed. Universidade de Passo Fundo. 3ª edição, 2014.

KOIDE, S.; SATTA, N. Separation Performance of Ion-exchange Membranes for Electrolytes in Drainage Nutrient Solutions subjected to Electrodialysis. **Biosystems Engineering**. v. 87, p. 89-97, 2004.

KWON M.J.; HWANG Y.; LEE J.; HAM B.; RAHMAN A.; AZAM H.; YANG J.S. Waste nutrient solutions from full-scale open hydroponic cultivation: Dynamics of effluent quality and removal of nitrogen and phosphorus using a pilot-scale sequencing batch reactor. **Journal of Environmental Management**, v. 281, p. 1-11, 2021.

LAVAT, A.E.; GRASELLI, M.C. Synthesis and characterization of ceramic materials based on the system MgO-CaO-TiO₂ from Dolomite. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 162-171, 2015.

LEITE, R.; LUCHETA, A.; HOLANDA, R.; PEREIRA SILVA, P.; VILAÇA DO CARMO, A.; LEITE, R.; AMORIM DE MELO, C.; VIERA DA COSTA, R.; MONTINI, M.; FERNANDES, A. Bauxite residue valorization - Soil conditioners production through composting with palm oil mill residual biomass, **Science of The Total Environment**, v. 835, 155413, 2022.

LEYVA-RAMOS, R. Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida, en sólidos porosos. Preparación, caracterización y aplicaciones por J.C. Moreno Piraján, Ediciones Uniandes, Bogotá, Colombia. p. 155-207, 2007.

LI, X.; KUANG, Y.; CHEN, J.; WU, D. Competitive adsorption of phosphate and dissolved organic carbon on lanthanum modified zeolite. **J. Colloid Interface Sci.**, v. 574, p. 197-206, 2020.

LIAO, T.; LI, T.; SU, X.; YU, X.; SONG, H.; ZHU, Y.; ZHANG, Y. La(OH)₃-modified magnetic pineapple biochar as novel adsorbents for efficient phosphate removal. **Bioresour. Technol.**, v. 263, p. 207-213, 2018.

LIRA, A.C. Lodo de esgoto em plantações de eucalipto: carbono, nitrogênio e aspectos da fotossíntese. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 123, 2006.

LIU, X.; ZHANG, L. Removal of phosphate anions using the modified chitosan beads: adsorption kinetic, isotherm and mechanism studies. **Powder Technol.**, v. 277, p. 112-119, 2015.

LLOYD, M.K.; EILER, J.M.; NABELEK, P.I. Clumped isotope thermometry of calcite and dolomite in a contact metamorphic environment. **Geochim. Cosmochim.** v. 197, p. 323-344, 2017.

LOPES, A. **Manual internacional de fertilidade do solo**/Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2 ed., rev. e ampl. Piracicaba: POTAFOS, p. 177, 1998.

LOPES, A.; SILVA, M.; GUILHERME, L.R. **Acidez do solo e calagem**. 3° ed. (Boletim Técnico, 1), São Paulo, ANDA. p. 22, 1991.

LÓPEZ, O.; GONZÁLEZ, E.; DE LLAMAS, P.; MOLINAS, A.; FRANCO, S.; GARCÍA, S.; RÍOS, E. Estudio de Reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la Región Oriental del Paraguay. Proyecto de Racionalización del uso de la tierra SSERNMA/MAG/Banco Mundial. Asunción, Paraguay, p. 246, 1995.

LORA, R. **Capítulo 2: Propiedades químicas del suelo**. En: Burbano, O. & Silva M F (eds). *Ciencia del suelo principios básicos*. Primera edición. Bogotá DC: Editorial Guadalupe S.A., p. 77- 134. 2010.

LOZADA, C.M. Índice de qualidade do solo para a avaliação do impacto de diferentes usos e manejos e sua aplicação em uma área rural de Planaltina (DF). Universidade de Brasília. p. 91, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/18739>.

MA, Z.; LI, Q.; YUE, Q.; GAO, B.; LI, W.; XU, X.; ZHONG, Q. Adsorption removal of ammonium and phosphate from water by fertilizer controlled release agent prepared from wheat straw, **Chemical Engineering Journal**, v. 171, Issue 3, p. 1209-1217, 2011.

MANGWANDI, CH.; ALBADARIN, A.; GLOCHEUX, Y.; WALKER, G.M. Removal of ortho-phosphate from aqueous solution by adsorption onto dolomite. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 2, p. 1123-1130, 2014.

MARON, S.; PRUTTON, C. **Fundamentos de fisicoquímica**. Editorial Limusa, México, D.F., p. 822-828, 1997.

MARQUEZI, M. Características físico-químicas e avaliação das propriedades tecnológicas do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, Florianópolis, 2013.

MARTINEZ IBARRA, Y.D.; YEPEZ ARAUZ, H.Y. Comportamiento agronómico del cultivo de haba (*vicia faba* l.) con diferentes dosis de abonos orgánicos más ácido húmico en el sector Chipe Hamburgo, Cantón La Maná. La Maná-Ecuador. p. 87, 2022.

MELO, R.F.; FERREIRA, P.A.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; OLIVEIRA, L.B. Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 456-465, 2006.

MENEGHETTI, A.M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise química de plantas, solo e fertilizantes**. Curitiba: EDUTFPR, p. 252, 2018.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. International Potash Institute. Berne, Switzerland, 1978.

MESQUITA, M.A.M., SILVEIRA, P.M., LEANDRO, W.M., FLORES, R.A., MARANHÃO, D.D.C., DRIS standards for nutritional evaluation of *Phaseolus vulgaris* in Cerrado, Goiás state, Brazil. *Aust. J. Crop Sci.*, v. 12 (02), p. 274-280, 2018.

MIAO, P.; ZHU, P.; ZHANG, S.; LI, W.; ZHOU, J.; CHEN, Z. Long-term high nitrogen surplus in intensive apple-planting regions results in huge legacy nitrogen in the vadose zone: Potential or real risk to the groundwater?, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 357, 108682, 2023.

MITROGIANNIS, D.; PSYCHOYOU, M.; KOUKOUZAS, N.; TSOUKALAS, N.; PALLES, D.; KAMITSOS, E.; BAZIOTIS, I. Phosphate recovery from real fresh urine by Ca(OH)₂ treated natural zeolite. *Chem. Eng. J.*, v. 347, p. 618-630, 2018.

MIYAMA, Y.; SUNADA, K.; FUJIWARA, S.; HASHIMOTO, K., Photocatalytic treatment of waste nutrient solution from soil-less cultivation of tomatoes planted in rice hull substrate. *Plant Soil*, v. 318 (1-2), p. 275-283, 2009.

MOERMAN, W.; CARBALLA, M.; VANDEKERCKHOVE, A.; DERYCKE, D.; VERSTRAETE, W. Phosphate removal in agro-industry: Pilot- and full-scale operational considerations of struvite crystallization. *Water Research*, v. 43, p. 1887-1892, 2009.

ÑÚSTEZ-CASTAÑO, S.A.; VILLAMIZAR-CASTRO, D.O.; VARGAS-SOLANO, E.M. Evaluation of dolomite as catalyst in the transesterification reaction using palm oil (RBD). *Revista DYNA*, v. 86(209), p. 180-187, 2019.

OLEYNIK, J.; BRAGAGNOLO, N.; BUBLITZ, U.; SILVA, J.C. **Análises do solo: tabelas para transformação de resultados analíticos e interpretação de resultados.** 5 ed. Curitiba, EMATER, p. 64, 1998.

OLIVEIRA F.; H.T., NOVAIS, R.F.; ÁLVAREZ, V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. En: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Tópicos em Ciência do solo**, v. 2, p. 394-486, Viçosa, Brasil. 2002.

OSORNO HENAO, H. Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín - Colombia, p. 70, 2012.

PARK, J.B.K.; CRAGGS, R.J.; SUKIAS, J.P.S. Treatment of hydroponic wastewater by denitrification filters using plant prunings as the organic carbon source. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 2711-2716, 2008.

PARK, J.H.; KIM, S.H.; DELAUNE, R.D.; CHO, J.S.; HEO, J.S.; OK, Y.S.; SEO, D.C. Enhancement of nitrate removal in constructed wetlands utilizing a combined autotrophic and heterotrophic denitrification technology for treating hydroponic wastewater containing high nitrate and low organic carbon concentrations. *Agric. Water Manag.*, v. 162, p. 1-14, 2015.

PARLAMENTO EUROPEO. Servicio de prensa, Dirección General de Comunicación Parlamento Europeo. Notas de prensa 24-10-2017 - Número de referencia: 20171020IPR86544. 2017. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20171020IPR86544/abonos-organicos-y-mas-seguros-en-la-ue>

PERALTA MORENO, G.A. Efecto de diferentes dosis de material calcáreo sobre el pH y acidez intercambiable en suelos ácidos de textura arcillosa y arenosa en los distritos de Hernandarias y Nueva Italia. San Lorenzo, Paraguay, p. 89, 2019.

PINTO, J. Propriedades físicas, químicas, nutricionais e tecnológicas de feijões (*Phaseolus vulgaris* L.) de diferentes grupos de cor. Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, da Escola de Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, p.167, 2016.

PIOL, M.N.; PARICOTO, M.; SARALEGUI, A.B.; BASACK, S.; VULLO, D.; BOEYKENS, S.P. Dolomite used in phosphate water treatment: Desorption processes, recovery, reuse and final disposition. **Journal of Environmental Management**, v. 237, p. 359-364, 2019.

PIQUÉ, T.M.; VÁZQUEZ, A. Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. **Concreto y cemento. Investigación y desarrollo**, v. 3, p. 62 -71, 2012.

POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE (Atlanta, Ga.). **International Soil Fertility Manual**. Atlanta, GA: Potash & Phosphate Institute, 1995.

POULADI, S.; ANDERSON, B.; WOOTTON, B.; ROZEMA, L. Evaluation of phytodesalination potential of vegetated bioreactors treating greenhouse effluent. **Water**, v. 8 (6), p. 20, 2016.

PREZOTTI, L.C.; GUARÇONI M.A. Guia de interpretação de análise de solo e foliar Vitória, ES: Incaper, ISBN 978-85-89274-21-0, 104 p., 2013.

PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. **Memoria Investigaciones en Ingeniería**, n. 15, p. 12, 2017.

PRIMAVESI, A.C.; PRIMAVESI, O. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, p. 28, 2004.

PRYSTAY, W.; LO, K.V. TREATMENT OF GREENHOUSE WASTEWATER USING CONSTRUCTED WETLANDS. **Journal of Environmental Science and Health**. Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, v. 36, p. 341-353, 2001.

QUAGGIO; J.A.; RAIJ; B.V. **Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total**. In: Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais. Editado pelo Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, SP. Cap. 10., p. 181-188, 2001.

QUINTERO, D.R. **Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilizantes para la caña de azúcar**. Cali. Centro De Investigación De La Caña De Azúcar De Colombia, p. 20, 1993.

QUIROGA, M.J. Efecto de la aplicación de materiales encalantes en el cultivo de la vid cv. Mencía en la D.O. Bierzo, incidencia sobre la composición fenólica y evolución en la crianza

del vino. Tesis Doctoral. Universidad de León. León, ES. p. 299, 2014.

RABEK, J.F. **Experimental Methods in Polymer Chemistry: Physical**, 1980.

RAMAKRISHNAN, V.; NAYAR, V.U.; ARULDHAS, G. Vibrational spectra of cesium tellurate phosphate. **Infra. Phys.**, v. 26, p. 353-356, 1986.

RAMÍREZ, J.H.; MARTÍNEZ, O.M.; FERNÁNDEZ, L.M. Remoción de contaminantes en aguas residuales industriales empleando carbón activado de pino pátula. **AVANCES Investigación en Ingeniería**, v. 10, n. 1, p. 42-49, 2013.

REED, S.J.B. **Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology**, New York, Cambridge University Press, p. 201, 1996.

RODRIGHERO, M.B.; BARTH, G.; FÁVERO CAIRES, E. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 39, p. 1723-1736, 2015.

RODRÍGUEZ DEL ÁNGEL, J.M. Métodos de Investigación Pecuaria. Ed. Trillas. 1ra. Impresión. México. p. 208, 1991.

RODZIEWICZ, J.; MIELCAREK, A.; JANCZUKOWICZ, W.; JÓŹWIAK, T.; STRUK-SOKOŁOWSKA, J.; BRYSEWSKI, K. The share of electrochemical reduction, hydrogenotrophic and heterotrophic denitrification in nitrogen removal in rotating electrobiological contactor (REBC) treating wastewater from soilless cultivation systems. **Sci. Total Environ.**, v. 683, p. 21-28, 2019.

RONQUIM, C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais/Carlos Cesar Ronquim. - Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 26 p.: il. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8), 2010.

RONQUIM, C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais/Carlos Cesar Ronquim. - 2.ed. - Campinas: Embrapa Territorial, 34 p.: il.; (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Territorial, 35), 2020.

SALAMEH, Y.; ALBADARIN, A.B.; ALLEN, S.; WALKER, G.; AHMAD, M.N. Arsenic (III,V) adsorption onto charred dolomite: Charring optimization and batch studies. **Chemical Engineering Journal**, v. 259, p. 663-671, 2015.

SALINAS, D.; BARRETO, S.; COLMÁN, J.M.; MEZA, W.; RECALDE, S.; LEZCANO, I. Rendimiento de Habilla Negra (*Paseolus Vulgaris* L.) Influenciado por la Aplicación de Fertilizantes Químicos. **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, v. 7, p. 12, 2023.

SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. Fisiología vegetal. Trad. al español por V. González Velásquez. 4a ed. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F., 1994.

SAMBO, P.; NICOLETTO, C.; GIRO, A.; PII, Y.; VALENTINUZZI, F.; MIMMO, T.; LUGLI, P.; ORZES, G.; MAZZETTO, F.; ASTOLFI, S.; TERZANO, R.; CESCO, S.

Hydroponic solutions for soilless production systems: issues and opportunities in a smart agriculture perspective. **Front. Plant Sci.**, v. 10 (923), p. 17, 2019.

SAMUDIO LEGAL, L.E. Caracterización de la dolomita para su uso en procesos de adsorción de fosfato en aguas. Libro de resúmenes de las XXVI Jornadas de Jóvenes Investigadores, Argentina, p. 705, 2018.

SAMUDIO, L.F. Efecto de enmiendas calcáreas sobre las propiedades químicas y biológicas en suelos incubados de Alto Paraná, Paraguay. Tesis/Universidad Nacional de Asunción, p. 63, 2020.

SANTOS, H. F. Normatização para o uso agrícola dos bio sólido no exterior e no Brasil, Capítulo 10. In: Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. (Org.). Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6), 2001.

SAXENA, P.; BASSI, A. Removal of nutrients from hydroponic greenhouse effluent by alkali precipitation and algae cultivation method. **J. Chem. Technol. Biotechnol.**, v. 88 (5), p. 858-863, 2013.

SILVA, M.L; TREVIZAM, A.R. Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. Informações agrônomicas N° 149, 2015. Disponível em: <http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/8C2796BCB76E0F9B83257E20006560E2/%24FILE/Page10-16-149.pdf>.

SIQUEIRA, P.R.; PALACIOS V. Función de respuesta del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a variaciones de humedad del suelo en tres etapas fenológicas y aspectos fisiológicos. **Agrociencia**, v. 59, p. 39-54, 1985.

SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A. **Principios de Análisis Instrumental**. Ed. Mc Graw Hill. Madrid, España, 1998.

SMITH, M.R.; VENEKLAAS, E.; POLANIA, J.; RAO, I.M.; BEEBE, S.E.; MERCHANT, A. Field drought conditions impact yield but not nutritional quality of the seed in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **PLoS One**, v. 14(6), p. 12, 2019.

SOARES, R.A.L.; DO NASCIMENTO, R.M., PASKOCIMAS, C.A.; CASTRO, R.J.S. Avaliação da adição de dolomita em massa de cerâmica de revestimento de queima vermelha. **Cerâmica**, v. 60, p. 516-523, 2014.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C. Dolomite and phosphogypsum surface application effects on annual crops nutrition and yield. **Agronomy Journal**, v. 100, p. 261-270, 2008.

SUN, D.; HALE, L.; KAR, G.; SOOLANAYAKANAHALLY, R.; ADL, S. Phosphorus recovery and reuse by pyrolysis: Applications for agriculture and environment. **Chemosphere**, v. 194, p. 682-691, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Plant Physiology and Development**, Sixth Edition, Sinauer Associates, Publishers. Sunderland, MA, p. 888, 2015.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3^o ed. rev. e ampl. Brasília, DF. Embrapa, 2017.

TSIRAMBIDES, A. Industrial applications of the dolomite from potamia, Thassos Island, N. Aegean Sea, Greece, **Mater. Struct.**, v. 34, p.110-113, 2001.

UYSAL, A.; DEMIR, S.; SAYILGAN, E.; ERASLAN, F.; KUCUKYUMUKET, Z. Optimization of struvite fertilizer formation from baker's yeast wastewater: Growth and nutrition of maize and tomato plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, p. 3264-3274, 2014.

UYSAL, A.; YILMAZEL, Y.D.; DEMIRER, G.N. The determination of fertilizer quality of the formed struvite from effluent of a sewage sludge anaerobic digester. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, p. 248-254, 2010.

VANREPPELEN, K.; SCHREURS, S.; KUPPENS, T.; THEWYS, T.; CARLEER, R.; YPERMAN, J. Activated carbon by co-pyrolysis and steam activation from particle board and melamine formaldehyde resin: production, adsorption properties and techno economic evaluation. **J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.**, v. 1 (1), p. 41-57, 2013.

VIADÉ, A.; FERNÁNDEZ-MARCOS, M.; HERNÁNDEZ-NISTAL, J.; ÁLVAREZ, E. Effect of particle size of limestone on Ca, Mg and K contents in soil and in sward plants. **Scientia Agricola**, v. 68(2), p. 200-208, 2011.

VILLAR, M.L.P. **Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação**. Cuiabá: EMPAER-MT (EMPAER-MT, Série Documentos, 35), p. 182, 2007.

VITTI, G.C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, p. 299-326, 2006.

WALKER, G.M.; HANSEN, L.; HANNA, J.A.; ALLEN, S.J. Kinetics of a reactive dye adsorption onto dolomitic sorbents. **Water Research**, v. 37, p. 2081-2089, 2003.

WANG, X.; LÜ, S.; GAO, C.; FENG, C.; XU, X.; BAI, X.; WU, L. Recovery of ammonium and phosphate from wastewater by wheat straw-based amphoteric adsorbent and reusing as a multifunctional slow-release compound fertilizer. **ACS Sustain. Chem. Eng.**, v. 4, p. 2068-2079, 2016.

WEI, Y.; YUAN, P.; SONG, Y.; LIU, D.; LOSIC, D.; TAN, D.; ZHOU, J. Activating 2D nano kaolinite using hybrid nanoparticles for enhanced phosphate capture. **Chem. Commun.**, v. 54, p. 11649-11652, 2018.

WHITE, S. Wetland technologies for nursery and greenhouse compliance with nutrient regulations. **Hortscience**, v. 48 (9), p. 1103-1108, 2013.

WHITE, W.B. The carbonate minerals in Farmer, V.C., (ed.). The infrared spectra of minerals, **Min. Soc. Monogr.**, v. 4(0), p. 227-284, 1974.

XIANG, C.; WANG, H.; JI, Q.; ZHANG, G.; QU, J. Tracking internal electron shuttle using X-ray spectroscopies in La/Zr hydroxide for reconciliation of charge transfer interaction and

coordination toward phosphate. **ACS Appl. Mater. Interfaces**, v. 11, p. 24699-24706, 2019.

XU, K.; LIN, F.; DOU, X.; ZHENG, M.; TAN, W.; WANG, CH. Recovery of ammonium and phosphate from urine as value-added fertilizer using wood waste biochar loaded with magnesium oxides. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 205-214, 2018.

YANG, W.; SHI, X.; WANG, J.; CHEN, W.; ZHANG, L.; ZHANG, W.; LU, J. Fabrication of a novel bifunctional nanocomposite with improved selectivity for simultaneous nitrate and phosphate removal from water. **ACS Appl. Mater. Interfaces**, v. 11, p. 35277-35285, 2019.

YU, J.; XIANG, C.; ZHANG, G.; WANG, H.; JI, Q.; QU, J. Activation of lattice oxygen in LaFe (oxy) hydroxides for efficient phosphorus removal. **Environ. Sci. Technol.** v. 53, p. 9073-9080, 2019.

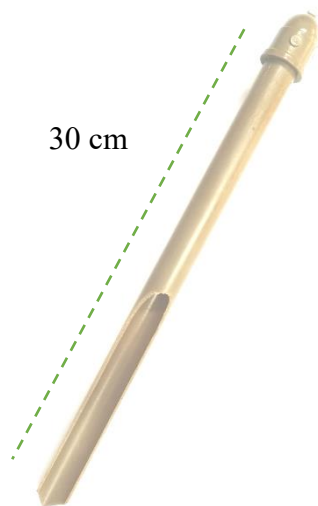
ZHANG, L.; WANG, Z.; XU, X.; CHEN, C.; GAO, B.; XIAO, X. Insights into the phosphate adsorption behavior onto 3D self-assembled cellulose/graphene hybrid nanomaterials embedded with bimetallic hydroxides. **Sci. Total Environ.**, v. 653, p. 897-907, 2019.

ZHANG, Y.; GUO, X.M.; WU, F.; YAO, Y.; YUAN, Y.F.; BI, X.X.; LUO, X.Y.; SHAHBAZIAN-YASSAR, R.; ZHANG, C.Z.; AMINE, K. Mesocarbon microbead carbonsupported magnesium hydroxide nanoparticles: turning spent Li-ion battery anode into a highly efficient phosphate adsorbent for wastewater treatment. **ACS Appl. Mater. Interfaces**, v. 8, p. 21315-21325, 2016.

ZHU, X.; MIAO, P.; QIN, J.; LI, W.; WANG, L.; CHEN, Z.; ZHOU, J. Spatio-temporal variations of nitrate pollution of groundwater in the intensive agricultural region: Hotspots and driving forces, **Journal of Hydrology**, v. 623, p. 135-224 2023.

9. APÊNDICES

Fotografia 1. Coletor de amostras de solo.



Fotografia 2. Coleta de amostra de efluente hidropônico.



Fotografia 3. Filtração da amostra após passar pelo processo de adsorção.



Fotografia 4. Análise das amostras com o espectrofotômetro de absorção atômica.



Fotografia 5. Coleta de amostras de solo.



Fotografia 6. Condicionamento de amostras de solo antes da análise (trituração e peneiramento).



Fotografia 7. Pesagem de amostra de solo e corretivo e posterior mistura.



Fotografia 8. Controle de umidade do solo com aparelho portátil.



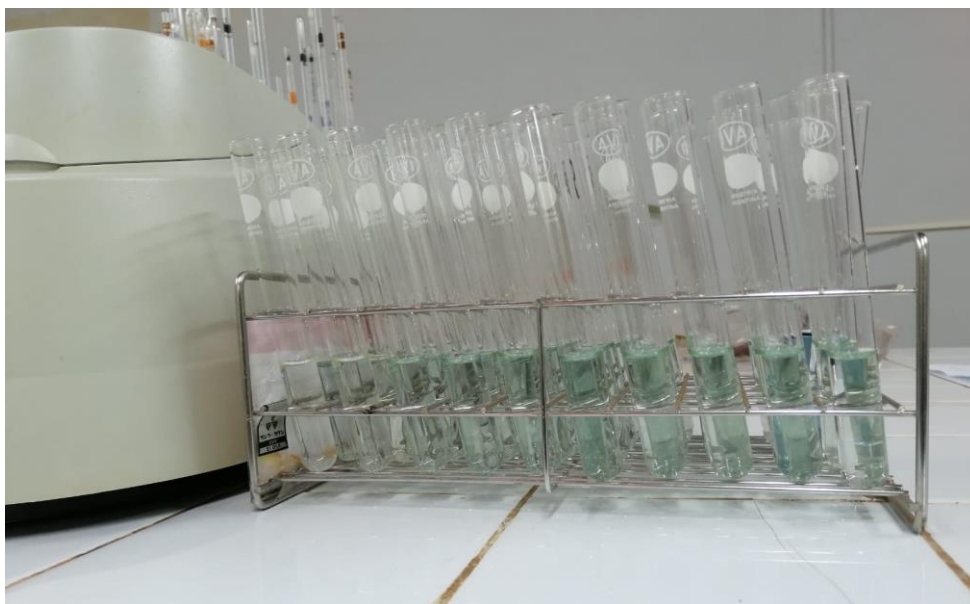
Fotografia 9. Extração de amostra de solo e transferência para o saco de polietileno com fecho ziplock.



Fotografia 10. Amostras transferidas para o laboratório.



Fotografia 11. Amostras preparadas para análise de fósforo.



Fotografia 12. Análise de alumínio.



Fotografia 13. Instalação de unidades experimentais para plantio.



Fotografia 14. Tratamento de sementes com fungicida.



Fotografia 15. Semeadura do feijão.



Fotografia 16. Germinação do feijão.



Fotografia 17. Aspecto das plantas.



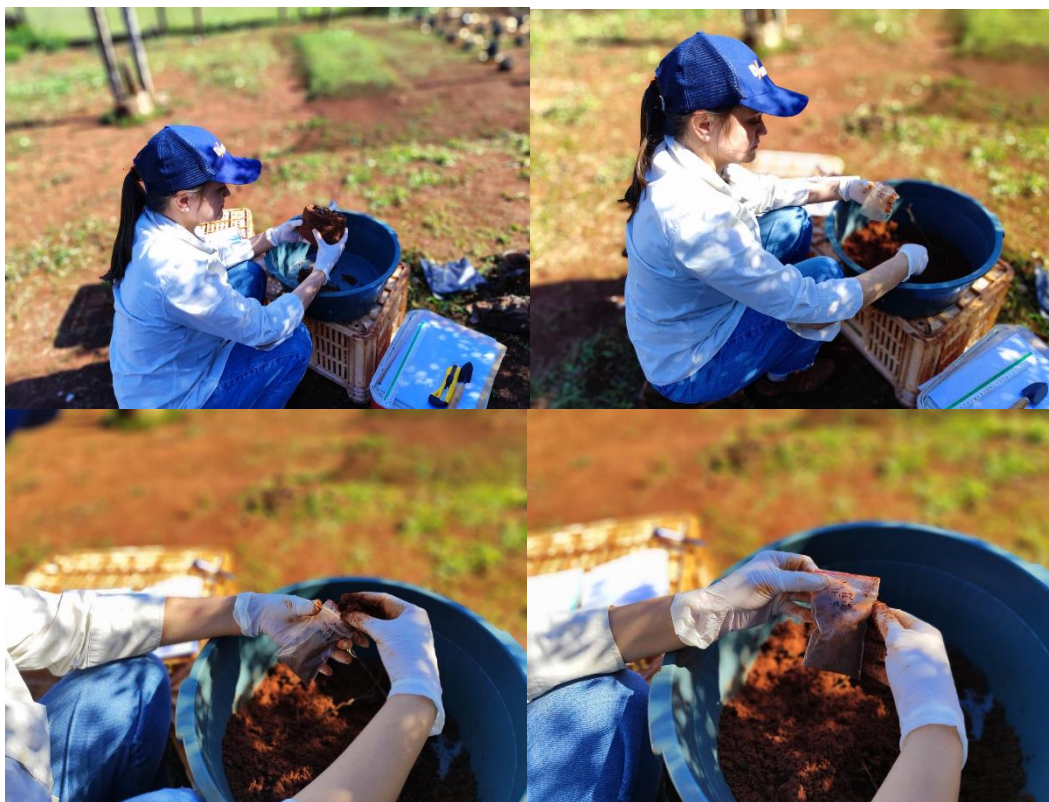
Fotografia 18. Estágio de floração, brotação de vagens e secagem das vagens.



Fotografia 19. Colheita de vagens.



Fotografia 20. Amostragem de solo após a colheita de vagens.



Fotografia 21. Vagens coletadas.



Fotografia 22. Medição do comprimento de vagens.



Fotografia 23. Grãos separados para análise.



Fotografia 24. Trituração de grãos para análise foliar.




Desenho 1. Croqui contendo a disposição dos vasos com os diferentes tratamentos.

T3R1 ARGILOSO	T4R4 ARENOSO	T1R2 ARENOSO	T4R1 ARENOSO	T3R2 ARGILOSO
T4R3 ARGILOSO	T1R1 ARGILOSO	T1R4 ARENOSO	T2R4 ARGILOSO	T1R1 ARENOSO
T4R2 ARENOSO	T3R5 ARENOSO	T2R1 ARGILOSO	T4R4 ARGILOSO	T2R2 ARENOSO
T3R3 ARENOSO	T1R2 ARGILOSO	T2R3 ARENOSO	T4R3 ARENOSO	T3R4 ARGILOSO
T2R5 ARENOSO	T3R4 ARENOSO	T2R4 ARENOSO	T2R2 ARGILOSO	T2R3 ARGILOSO
T4R5 ARGILOSO	T1R5 ARENOSO	T3R1 ARENOSO	T2R5 ARGILOSO	T1R3 ARGILOSO
T1R3 ARENOSO	T3R3 ARGILOSO	T1R4 ARGILOSO	T2R1 ARENOSO	T3R2 ARENOSO
T3R5 ARGILOSO	T1R5 ARGILOSO	T4R5 ARENOSO	T4R2 ARGILOSO	T4R1 ARGILOSO

10. ANEXOS

Anexo 1. Especificações do calcário dolomítico granulado.

	ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTO ACABADO	Revisão: 02
	BRM F 14 - EPA 41.01 – DOLOMITA 101/010	Data: 23/10/07
		Página: 1/1

1- CARACTERÍSTICAS INFORMATIVAS

1.1 – Composição Básica: Carbonato de Cálcio e Magnésio (CaMg (CO₃)₂)

1.2 – Características Químicas Típicas – Referencial

CaO	31,90 %
SiO ₂	5,10 %
MgO	18,30 %
Al ₂ O ₃	0,25 %
Fe ₂ O ₃	0,10 %
Densidade Aparente (g/cm ³)	1,40 a 1,90
Peso Específico (g/cm ³)	2,60 a 2,90
Perda ao Fogo (850°C) (%)	46,00
pH (solução aquosa 5%)	7,0 a 11,0
Umidade (%)	Máx. 1,0

A análise química é uma média de vários lotes e não é controlada lote a lote, portanto serve somente como referencial.



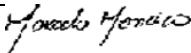
2- PROPRIEDADES CONTROLADAS

CARACTERÍSTICAS	LIMITE DE VARIAÇÃO	MÉTODO DE ENSAIO
Cor	Branca	IT BRM 19
Retenção # 10 mesh (2,00 mm) (%)	Min. 30,0	IT BRM 5

3 – EMBALAGEM: Sacos de rafia com peso líquido de 25 kg por saco.

4 – MANUSEIO E ESTOCAGEM: Manuseio e armazenamento em local seco e arejado. Empilhamento máximo de 2 pallets.

5 – PRAZO DE VALIDADE DO PRODUTO: 5 anos a partir da data de fabricação.

ELABORAÇÃO/REVISÃO	ANÁLISE CRÍTICA	APROVAÇÃO
Nome: Alberto S. Santos	Nome: Reginaldo da Silva	Nome: Marcelo Monaco da Cunha
Data: 23/10/07	Data: 23/10/07	Data: 23/10/07
Assinatura: 	Assinatura: 	Assinatura: 

CONTROLE DE REVISÕES

Revisão	Descrição	Data
00	Emissão inicial.	14/07/00
01	Padronização estética para documentos da qualidade. Atualizações nas propriedades físicas e químicas	10/08/06
02	Atualização da numeração do método de ensaio	23/10/07

Anexo 2. Análise estatística dos resultados obtidos durante o período de incubação em solo arenoso.

Análisis de la varianza

30 - pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
30 - pH	20	0,70	0,64	2,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,46	3	0,15	12,46	0,0002
Tratamientos	0,46	3	0,15	12,46	0,0002
Error	0,20	16	0,01		
Total	0,65	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,20003

Error: 0,0122 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	4,32	5	0,05	A
T4	4,58	5	0,05	B
T2	4,64	5	0,05	B
T3	4,72	5	0,05	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
60 - pH	20	0,82	0,79	5,83

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5,92	3	1,97	24,53	<0,0001
Tratamientos	5,92	3	1,97	24,53	<0,0001
Error	1,29	16	0,08		
Total	7,21	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,51330

Error: 0,0805 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	4,17	5	0,13	A
T4	4,59	5	0,13	A B
T2	5,08	5	0,13	B
T3	5,63	5	0,13	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
90 - pH	20	0,96	0,95	3,91

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16,19	3	5,40	123,43	<0,0001
Tratamientos	16,19	3	5,40	123,43	<0,0001
Error	0,70	16	0,04		
Total	16,89	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,37837

Error: 0,0437 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	4,42	5	0,09	A
T4	4,49	5	0,09	A
T3	6,06	5	0,09	B
T2	6,42	5	0,09	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

30 - AIVariable N R² R²Aj CV

30 - AI 20 0,84 0,81 25,57

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0,09	3	0,03	28,67	<0,0001
Tratamientos	0,09	3	0,03	28,67	<0,0001
Error	0,02	16	1,1E-03		
Total	0,11	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,05898

Error: 0,0011 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T2	0,06	5	0,01	A
T3	0,06	5	0,01	A
T1	0,19	5	0,01	B
T4	0,20	5	0,01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - AIVariable N R² R²Aj CV

60 - AI 20 0,98 0,98 15,31

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,35	3	0,78	285,14	<0,0001
Tratamientos	2,35	3	0,78	285,14	<0,0001
Error	0,04	16	2,7E-03		
Total	2,40	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,09489

Error: 0,0027 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T2	0,00	5	0,02	A
T3	0,00	5	0,02	A
T4	0,66	5	0,02	B
T1	0,71	5	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - AIVariable N R² R²Aj CV

90 - AI 20 0,99 0,98 13,17

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,67	3	0,89	384,65	<0,0001
Tratamientos	2,67	3	0,89	384,65	<0,0001
Error	0,04	16	2,3E-03		
Total	2,71	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08701

Error: 0,0023 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T3	0,00	5	0,02	A
T2	0,00	5	0,02	A
T4	0,71	5	0,02	B
T1	0,75	5	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

30 - Ca

Variable N R² R²Aj CV

30 - Ca 20 0,91 0,89 23,06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	6,15	3	2,05	54,07	<0,0001
Tratamientos	6,15	3	2,05	54,07	<0,0001
Error	0,61	16	0,04		
<u>Total</u>	<u>6,76</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,35245

Error: 0,0379 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	0,24	5	0,09	A
T1	0,34	5	0,09	A
T3	1,35	5	0,09	B
T2	1,44	5	0,09	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - Ca

Variable N R² R²Aj CV

60 - Ca 20 0,90 0,88 18,64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	5,71	3	1,90	48,24	<0,0001
Tratamientos	5,71	3	1,90	48,24	<0,0001
Error	0,63	16	0,04		
<u>Total</u>	<u>6,34</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,35945

Error: 0,0395 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	0,46	5	0,09	A
T4	0,64	5	0,09	A
T3	1,41	5	0,09	B
T2	1,75	5	0,09	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - Ca

Variable N R² R²Aj CV

90 - Ca 20 0,84 0,81 30,33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	7,43	3	2,48	27,77	<0,0001
Tratamientos	7,43	3	2,48	27,77	<0,0001
Error	1,43	16	0,09		
<u>Total</u>	<u>8,85</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,54026

Error: 0,0891 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	0,35	5	0,13	A
T1	0,46	5	0,13	A
T3	1,32	5	0,13	B
<u>T2</u>	<u>1,81</u>	<u>5</u>	<u>0,13</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**30 - Mg**

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
30 - Mg	20	0,96	0,95	18,04

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,57	3	0,86	119,49	<0,0001
Tratamientos	2,57	3	0,86	119,49	<0,0001
Error	0,11	16	0,01		
<u>Total</u>	<u>2,68</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,15322

Error: 0,0072 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	0,09	5	0,04	A
T1	0,14	5	0,04	A
T3	0,80	5	0,04	B
<u>T2</u>	<u>0,85</u>	<u>5</u>	<u>0,04</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**60 - Mg**

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
60 - Mg	20	0,95	0,94	23,25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	3,14	3	1,05	93,19	<0,0001
Tratamientos	3,14	3	1,05	93,19	<0,0001
Error	0,18	16	0,01		
<u>Total</u>	<u>3,32</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,19188

Error: 0,0112 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	0,07	5	0,05	A
T1	0,07	5	0,05	A
T3	0,71	5	0,05	B
<u>T2</u>	<u>0,97</u>	<u>5</u>	<u>0,05</u>	<u>C</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - Mg

Variable N R² R²Aj CV

90 - Mg 20 0,97 0,96 15,79

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,06	3	0,69	147,69	<0,0001
Tratamientos	2,06	3	0,69	147,69	<0,0001
Error	0,07	16	4,6E-03		
<u>Total</u>	<u>2,13</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,12329

Error: 0,0046 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	0,11	5	0,03	A
T1	0,12	5	0,03	A
T3	0,71	5	0,03	B
<u>T2</u>	<u>0,79</u>	<u>5</u>	<u>0,03</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

30 - P

Variable N R² R²Aj CV

30 - P 20 0,45 0,34 6,61

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	1,61	3	0,54	4,31	0,0209
Tratamientos	1,61	3	0,54	4,31	0,0209
Error	2,00	16	0,12		
<u>Total</u>	<u>3,61</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,63926

Error: 0,1248 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	5,13	5	0,16	A
T3	5,15	5	0,16	A
T2	5,27	5	0,16	A B
<u>T1</u>	<u>5,83</u>	<u>5</u>	<u>0,16</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - P

Variable N R² R²Aj CV

60 - P 20 0,34 0,21 8,08

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,07	3	0,69	2,70	0,0803
Tratamientos	2,07	3	0,69	2,70	0,0803
Error	4,09	16	0,26		
<u>Total</u>	<u>6,15</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,91436

Error: 0,2553 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	5,86	5	0,23	A
T4	6,03	5	0,23	A
T2	6,55	5	0,23	A
<u>T3</u>	<u>6,59</u>	<u>5</u>	<u>0,23</u>	<u>A</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - P

Variable N R² R² Aj CV
 90 - P 20 0,53 0,44 6,14

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,46	3	0,82	5,90	0,0065
Tratamientos	2,46	3	0,82	5,90	0,0065
Error	2,23	16	0,14		
<u>Total</u>	<u>4,69</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,67501

Error: 0,1392 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	5,57	5	0,17	A
T3	5,99	5	0,17	A B
T2	6,23	5	0,17	A B
<u>T1</u>	<u>6,52</u>	<u>5</u>	<u>0,17</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 3. Análise estatística dos resultados obtidos durante o período de incubação em solo argiloso.

Análisis de la varianza

30 - pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
30 - pH	20	0,91	0,89	5,74

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	11,53	3	3,84	51,57	<0,0001
Tratamientos	11,53	3	3,84	51,57	<0,0001
Error	1,19	16	0,07		
Total	12,72	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,49390

Error: 0,0745 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	3,97	5	0,12	A
T4	4,04	5	0,12	A
T2	5,45	5	0,12	B
T3	5,58	5	0,12	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
60 - pH	20	0,76	0,72	2,84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,87	3	0,29	16,90	<0,0001
Tratamientos	0,87	3	0,29	16,90	<0,0001
Error	0,27	16	0,02		
Total	1,15	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,23714

Error: 0,0172 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	4,38	5	0,06	A
T4	4,50	5	0,06	A B
T2	4,67	5	0,06	B
T3	4,93	5	0,06	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
90 - pH	20	0,86	0,84	1,76

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,75	3	0,25	34,10	<0,0001
Tratamientos	0,75	3	0,25	34,10	<0,0001
Error	0,12	16	0,01		
Total	0,86	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,15447

Error: 0,0073 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	4,61	5	0,04	A
T1	4,73	5	0,04	A
T2	4,94	5	0,04	B
T3	5,11	5	0,04	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

30 - AIVariable N R² R²Aj CV

30 - AI 20 0,98 0,98 14,80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	1,54	3	0,51	304,27	<0,0001
Tratamientos	1,54	3	0,51	304,27	<0,0001
Error	0,03	16	1,7E-03		
Total	1,57	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,07433

Error: 0,0017 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T3	0,00	5	0,02	A
T2	0,00	5	0,02	A
T4	0,55	5	0,02	B
T1	0,56	5	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - AIVariable N R² R²Aj CV

60 - AI 20 0,79 0,75 30,85

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0,12	3	0,04	20,46	<0,0001
Tratamientos	0,12	3	0,04	20,46	<0,0001
Error	0,03	16	2,0E-03		
Total	0,16	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08122

Error: 0,0020 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T3	0,06	5	0,02	A
T2	0,08	5	0,02	A
T4	0,21	5	0,02	B
T1	0,24	5	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - AIVariable N R² R²Aj CV

90 - AI 20 0,94 0,93 28,76

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0,24	3	0,08	81,11	<0,0001
Tratamientos	0,24	3	0,08	81,11	<0,0001
Error	0,02	16	9,8E-04		
Total	0,25	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,05672

Error: 0,0010 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T3	0,00	5	0,01	A
T2	0,00	5	0,01	A
T4	0,21	5	0,01	B
T1	0,23	5	0,01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

30 - Ca

Variable N R² R²Aj CV

30 - Ca 20 0,58 0,51 8,18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,06	3	0,69	7,49	0,0024
Tratamientos	2,06	3	0,69	7,49	0,0024
Error	1,47	16	0,09		
<u>Total</u>	<u>3,53</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,54824

Error: 0,0918 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	3,34	5	0,14	A
T1	3,49	5	0,14	A
T2	3,80	5	0,14	A B
T3	4,18	5	0,14	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - Ca

Variable N R² R²Aj CV

60 - Ca 20 0,87 0,84 5,60

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	3,60	3	1,20	34,60	<0,0001
Tratamientos	3,60	3	1,20	34,60	<0,0001
Error	0,55	16	0,03		
<u>Total</u>	<u>4,15</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,33696

Error: 0,0347 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	2,77	5	0,08	A
T1	3,06	5	0,08	A
T2	3,74	5	0,08	B
T3	3,74	5	0,08	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - Ca

Variable N R² R²Aj CV

90 - Ca 20 0,63 0,56 8,90

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,69	3	0,90	9,07	0,0010
Tratamientos	2,69	3	0,90	9,07	0,0010

Error 1,58 16 0,10
 Total 4,28 19

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,56925

Error: 0,0990 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4 3,07 5 0,14 A
 T1 3,32 5 0,14 A B
 T2 3,72 5 0,14 B C
 T3 4,03 5 0,14 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

30 - Mg

Variable N R² R²Aj CV

30 - Mg 20 0,85 0,82 8,91

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5,43	3	1,81	30,54	<0,0001
Tratamientos	5,43	3	1,81	30,54	<0,0001
Error	0,95	16	0,06		
Total	6,38	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,44047

Error: 0,0593 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1 1,93 5 0,11 A
 T4 2,61 5 0,11 B
 T2 3,18 5 0,11 C
 T3 3,21 5 0,11 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

60 - Mg

Variable N R² R²Aj CV

60 - Mg 20 0,88 0,86 8,57

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4,76	3	1,59	40,87	<0,0001
Tratamientos	4,76	3	1,59	40,87	<0,0001
Error	0,62	16	0,04		
Total	5,38	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,35635

Error: 0,0388 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1 1,59 5 0,09 A
 T4 2,10 5 0,09 B
 T2 2,71 5 0,09 C
 T3 2,79 5 0,09 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - Mg

Variable N R² R²Aj CV

90 - Mg 20 0,82 0,78 9,81

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	2,79	3	0,93	23,63	<0,0001
Tratamientos	2,79	3	0,93	23,63	<0,0001
Error	0,63	16	0,04		
<u>Total</u>	<u>3,42</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,35875

Error: 0,0393 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T1	1,53	5	0,09	A
T4	1,80	5	0,09	A
T2	2,29	5	0,09	B
<u>T3</u>	<u>2,46</u>	<u>5</u>	<u>0,09</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**30 - P**Variable N R² R² Aj CV30 - P 20 0,64 0,57 7,52**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	3,91	3	1,30	9,50	0,0008
Tratamientos	3,91	3	1,30	9,50	0,0008
Error	2,19	16	0,14		
<u>Total</u>	<u>6,10</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,66977

Error: 0,1370 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T3	4,58	5	0,17	A
T4	4,60	5	0,17	A
T1	4,83	5	0,17	A
<u>T2</u>	<u>5,67</u>	<u>5</u>	<u>0,17</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**60 - P**Variable N R² R² Aj CV60 - P 20 0,46 0,36 13,17**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	8,80	3	2,93	4,53	0,0176
Tratamientos	8,80	3	2,93	4,53	0,0176
Error	10,37	16	0,65		
<u>Total</u>	<u>19,17</u>	<u>19</u>			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,45672

Error: 0,6481 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T4	5,64	5	0,36	A
T3	5,64	5	0,36	A
T2	5,93	5	0,36	A B
<u>T1</u>	<u>7,24</u>	<u>5</u>	<u>0,36</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

90 - P

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
90 - P	20	0,85	0,82	4,59

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4,95	3	1,65	30,37	<0,0001
Tratamientos	4,95	3	1,65	30,37	<0,0001
Error	0,87	16	0,05		
Total	5,82	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,42165

Error: 0,0543 gl: 16

Tratamientos Medias n E.E.

T2	4,71	5	0,10	A
T4	4,79	5	0,10	A
T3	4,87	5	0,10	A
T1	5,93	5	0,10	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 4. Análise estatística dos resultados obtidos durante o período de incubação em solo arenoso enquanto a interação entre tratamentos e tempo.

Análisis de la varianza

pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
pH	60	0,93	0,91	4,33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28,78	11	2,62	57,54	<0,0001
Tratamientos	15,40	3	5,13	112,92	<0,0001
Tiempo	6,21	2	3,11	68,30	<0,0001
Tratamientos*Tiempo	7,17	6	1,19	26,26	<0,0001
Error	2,18	48	0,05		
Total	30,96	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,20723

Error: 0,0455 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T1	4,30	15	0,06	A
T4	4,55	15	0,06	B
T2	5,38	15	0,06	C
T3	5,47	15	0,06	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,16309

Error: 0,0455 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

30	4,57	20	0,05	A
60	4,86	20	0,05	B
90	5,35	20	0,05	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,46310

Error: 0,0455 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T1	60	4,17	5	0,10	A
T1	30	4,32	5	0,10	A B
T1	90	4,42	5	0,10	A B
T4	90	4,49	5	0,10	A B
T4	30	4,58	5	0,10	A B
T4	60	4,59	5	0,10	A B
T2	30	4,64	5	0,10	B C
T3	30	4,72	5	0,10	B C
T2	60	5,08	5	0,10	C
T3	60	5,63	5	0,10	D
T3	90	6,06	5	0,10	D E
T2	90	6,42	5	0,10	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Al

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Al	60	0,98	0,98	16,23

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5,80	11	0,53	258,25	<0,0001
Tratamientos	4,01	3	1,34	654,61	<0,0001

Tiempo	0,69	2	0,34	168,39	<0,0001
Tratamientos*Tiempo	1,10	6	0,18	90,02	<0,0001
Error	0,10	48	2,0E-03		
Total	5,90	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,04391

Error: 0,0020 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T3	0,02	15	0,01	A
T2	0,02	15	0,01	A
T4	0,52	15	0,01	B
T1	0,55	15	0,01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,03456

Error: 0,0020 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

30	0,13	20	0,01	A
60	0,34	20	0,01	B
90	0,37	20	0,01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,09813

Error: 0,0020 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T3	90	0,00	5	0,02	A
T2	60	0,00	5	0,02	A
T2	90	0,00	5	0,02	A
T3	60	0,00	5	0,02	A
T2	30	0,06	5	0,02	A
T3	30	0,06	5	0,02	A
T1	30	0,19	5	0,02	B
T4	30	0,20	5	0,02	B
T4	60	0,66	5	0,02	C
T4	90	0,71	5	0,02	C
T1	60	0,71	5	0,02	C
T1	90	0,75	5	0,02	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Ca

Variable N R² R² Aj CV

Ca 60 0,88 0,85 24,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	19,79	11	1,80	32,41	<0,0001
Tratamientos	18,91	3	6,30	113,53	<0,0001
Tiempo	0,50	2	0,25	4,50	0,0161
Tratamientos*Tiempo	0,38	6	0,06	1,15	0,3498
Error	2,66	48	0,06		
Total	22,45	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,22897

Error: 0,0555 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T4	0,41	15	0,06	A
T1	0,42	15	0,06	A
T3	1,36	15	0,06	B
T2	1,67	15	0,06	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,18020

Error: 0,0555 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

30 0,84 20 0,05 A
90 0,98 20 0,05 A B
60 1,07 20 0,05 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,51169

Error: 0,0555 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T4 30 0,24 5 0,11 A
T1 30 0,34 5 0,11 A
T4 90 0,35 5 0,11 A
T1 90 0,46 5 0,11 A
T1 60 0,46 5 0,11 A
T4 60 0,64 5 0,11 A
T3 90 1,32 5 0,11 B
T3 30 1,35 5 0,11 B
T3 60 1,41 5 0,11 B
T2 30 1,44 5 0,11 B
T2 60 1,75 5 0,11 B
T2 90 1,81 5 0,11 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Mg

Variable N R² R² Aj CV

Mg 60 0,95 0,94 19,38

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7,79	11	0,71	92,09	<0,0001
Tratamientos	7,66	3	2,55	332,28	<0,0001
Tiempo	0,01	2	0,01	0,97	0,3880
Tratamientos*Tiempo	0,11	6	0,02	2,37	0,0437
Error	0,37	48	0,01		
Total	8,15	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08520

Error: 0,0077 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T4 0,09 15 0,02 A
T1 0,11 15 0,02 A
T3 0,74 15 0,02 B
T2 0,87 15 0,02 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,06705

Error: 0,0077 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

90 0,43 20 0,02 A
60 0,46 20 0,02 A
30 0,47 20 0,02 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,19039

Error: 0,0077 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T1 60 0,07 5 0,04 A
T4 60 0,07 5 0,04 A

T4	30	0,09	5 0,04	A
T4	90	0,11	5 0,04	A
T1	90	0,12	5 0,04	A
T1	30	0,14	5 0,04	A
T3	90	0,71	5 0,04	B
T3	60	0,71	5 0,04	B
T2	90	0,79	5 0,04	B C
T3	30	0,80	5 0,04	B C
T2	30	0,85	5 0,04	B C
T2	60	0,97	5 0,04	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

P

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P	60	0,65	0,57	7,06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15,47	11	1,41	8,12	<0,0001
Tratamientos	2,22	3	0,74	4,28	0,0094
Tiempo	9,33	2	4,66	26,94	<0,0001
Tratamientos*Tiempo	3,92	6	0,65	3,78	0,0037
Error	8,31	48	0,17		
Total	23,78	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,40433

Error: 0,1731 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T4	5,58	15	0,11	A
T3	5,91	15	0,11	A B
T2	6,02	15	0,11	B
T1	6,07	15	0,11	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,31820

Error: 0,1731 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

30	5,35	20	0,09	A
90	6,08	20	0,09	B
60	6,26	20	0,09	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,90355

Error: 0,1731 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T4	30	5,13	5 0,19	A
T3	30	5,15	5 0,19	A
T2	30	5,27	5 0,19	A
T4	90	5,57	5 0,19	A B
T1	30	5,83	5 0,19	A B C
T1	60	5,86	5 0,19	A B C
T3	90	5,99	5 0,19	A B C
T4	60	6,03	5 0,19	A B C
T2	90	6,23	5 0,19	B C
T1	90	6,52	5 0,19	C
T2	60	6,55	5 0,19	C
T3	60	6,59	5 0,19	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 5. Análise estatística dos resultados obtidos durante o período de incubação em solo argiloso enquanto a interação entre tratamentos e tempo.

Análisis de la varianza

pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
pH	60	0,90	0,87	3,83

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13,66	11	1,24	37,65	<0,0001
Tratamientos	8,59	3	2,86	86,75	<0,0001
Tiempo	0,52	2	0,26	7,85	0,0011
Tratamientos*Tiempo	4,56	6	0,76	23,03	<0,0001
Error	1,58	48	0,03		
Total	15,24	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,17650

Error: 0,0330 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T1	4,36	15	0,05	A
T4	4,38	15	0,05	A
T2	5,02	15	0,05	B
T3	5,21	15	0,05	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,13891

Error: 0,0330 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

60	4,62	20	0,04	A
30	4,76	20	0,04	B
90	4,84	20	0,04	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,39444

Error: 0,0330 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T1	30	3,97	5	0,08	A
T4	30	4,04	5	0,08	A B
T1	60	4,38	5	0,08	B C
T4	60	4,50	5	0,08	C
T4	90	4,61	5	0,08	C D
T2	60	4,67	5	0,08	C D
T1	90	4,73	5	0,08	C D E
T3	60	4,93	5	0,08	D E
T2	90	4,94	5	0,08	D E
T3	90	5,11	5	0,08	E F
T2	30	5,45	5	0,08	F G
T3	30	5,58	5	0,08	G

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Al

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Al	60	0,97	0,96	22,28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,22	11	0,20	129,08	<0,0001
Tratamientos	1,44	3	0,48	307,23	<0,0001
Tiempo	0,31	2	0,16	100,64	<0,0001

Tratamientos*Tiempo	0,46	6	0,08	49,49	<0,0001
Error	0,07	48	1,6E-03		
Total	2,29	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,03840

Error: 0,0016 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T3	0,02	15	0,01	A
T2	0,03	15	0,01	A
T4	0,32	15	0,01	B
T1	0,34	15	0,01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,03022

Error: 0,0016 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

90	0,11	20	0,01	A
60	0,15	20	0,01	B
30	0,28	20	0,01	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08582

Error: 0,0016 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T2	30	0,00	5	0,02	A
T2	90	0,00	5	0,02	A
T3	30	0,00	5	0,02	A
T3	90	0,00	5	0,02	A
T3	60	0,06	5	0,02	A
T2	60	0,08	5	0,02	A
T4	90	0,21	5	0,02	B
T4	60	0,21	5	0,02	B
T1	90	0,23	5	0,02	B
T1	60	0,24	5	0,02	B
T4	30	0,55	5	0,02	C
T1	30	0,56	5	0,02	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Ca

Variable N R² R²Aj CV

Ca	60	0,73	0,67	7,78
----	----	------	------	------

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9,78	11	0,89	11,83	<0,0001
Tratamientos	7,98	3	2,66	35,40	<0,0001
Tiempo	1,42	2	0,71	9,47	0,0003
Tratamientos*Tiempo	0,37	6	0,06	0,83	0,5534
Error	3,61	48	0,08		
Total	13,39	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,26640

Error: 0,0751 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T4	3,06	15	0,07	A
T1	3,29	15	0,07	A
T2	3,76	15	0,07	B
T3	3,98	15	0,07	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,20966

Error: 0,0751 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

60 3,33 20 0,06 A
90 3,54 20 0,06 A B
30 3,70 20 0,06 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,59533

Error: 0,0751 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T4 60 2,77 5 0,12 A
T1 60 3,06 5 0,12 A B
T4 90 3,07 5 0,12 A B
T1 90 3,32 5 0,12 A B C
T4 30 3,34 5 0,12 A B C
T1 30 3,49 5 0,12 B C D
T2 90 3,72 5 0,12 C D E
T2 60 3,74 5 0,12 C D E
T3 60 3,74 5 0,12 C D E
T2 30 3,80 5 0,12 C D E
T3 90 4,03 5 0,12 D E
T3 30 4,18 5 0,12 E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Mg

Variable N R² R² Aj CV

Mg 60 0,89 0,87 9,10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	18,09	11	1,64	35,92	<0,0001
Tratamientos	12,60	3	4,20	91,75	<0,0001
Tiempo	5,12	2	2,56	55,93	<0,0001
Tratamientos*Tiempo	0,37	6	0,06	1,34	0,2566
Error	2,20	48	0,05		
Total	20,29	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,20793

Error: 0,0458 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T1 1,68 15 0,06 A
T4 2,17 15 0,06 B
T2 2,73 15 0,06 C
T3 2,82 15 0,06 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,16364

Error: 0,0458 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

90 2,02 20 0,05 A
60 2,30 20 0,05 B
30 2,73 20 0,05 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,46467

Error: 0,0458 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T1 90 1,53 5 0,10 A
T1 60 1,59 5 0,10 A

T4	90	1,80	5 0,10	A B
T1	30	1,93	5 0,10	A B C
T4	60	2,10	5 0,10	B C D
T2	90	2,29	5 0,10	C D E
T3	90	2,46	5 0,10	D E F
T4	30	2,61	5 0,10	E F
T2	60	2,71	5 0,10	E F
T3	60	2,79	5 0,10	F G
T2	30	3,18	5 0,10	G
T3	30	3,21	5 0,10	G

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

P

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P	60	0,72	0,66	9,85

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	34,49	11	3,14	11,20	<0,0001
Tratamientos	9,74	3	3,25	11,60	<0,0001
Tiempo	16,83	2	8,41	30,07	<0,0001
Tratamientos*Tiempo	7,92	6	1,32	4,72	0,0008
Error	13,43	48	0,28		
Total	47,92	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,51405

Error: 0,2798 gl: 48

Tratamientos Medias n E.E.

T4	5,01	15	0,14	A
T3	5,03	15	0,14	A
T2	5,44	15	0,14	A
T1	6,00	15	0,14	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,40455

Error: 0,2798 gl: 48

Tiempo Medias n E.E.

30	4,92	20	0,12	A
90	5,08	20	0,12	A
60	6,11	20	0,12	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,14875

Error: 0,2798 gl: 48

Tratamientos Tiempo Medias n E.E.

T3	30	4,58	5 0,24	A
T4	30	4,60	5 0,24	A
T2	90	4,71	5 0,24	A
T4	90	4,79	5 0,24	A B
T1	30	4,83	5 0,24	A B
T3	90	4,87	5 0,24	A B
T3	60	5,64	5 0,24	A B
T4	60	5,64	5 0,24	A B
T2	30	5,67	5 0,24	A B
T2	60	5,93	5 0,24	B
T1	90	5,93	5 0,24	B
T1	60	7,24	5 0,24	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 6. Análise estatística dos resultados obtidos do desempenho agrônômico do feijão em solo arenoso.

Análisis de la varianza

NUMERO DE VAINAS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NUMERO DE VAINAS	20	0,18	0,03	42,51

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4,15	3	1,38	1,18	0,3495
TRATAMIENTOS	4,15	3	1,38	1,18	0,3495
Error	18,80	16	1,18		
Total	22,95	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,96142

Error: 1,1750 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T1	2,00	5	0,48	A
T4	2,20	5	0,48	A
T3	3,00	5	0,48	A
T2	3,00	5	0,48	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

LONGITUD DE VAINAS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
LONGITUD DE VAINAS	20	0,09	0,00	12,35

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,45	3	0,48	0,53	0,6657
TRATAMIENTOS	1,45	3	0,48	0,53	0,6657
Error	14,46	16	0,90		
Total	15,91	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,72009

Error: 0,9037 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T4	7,31	5	0,43	A
T1	7,62	5	0,43	A
T2	7,81	5	0,43	A
T3	8,05	5	0,43	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

NUMERO DE GRANOS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NUMERO DE GRANOS	20	0,02	0,00	33,43

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,15	3	0,05	0,12	0,9484
TRATAMIENTOS	0,15	3	0,05	0,12	0,9484
Error	6,80	16	0,43		
Total	6,95	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,17963

Error: 0,4250 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T3 1,80 5 0,29 A

T4 2,00 5 0,29 A

T2 2,00 5 0,29 A

T1 2,00 5 0,29 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

PESO DE 100 GRANOS

Variable N R² R² Aj CV

PESO DE 100 GRANOS 20 0,91 0,89 8,69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo 444,40 3 148,13 51,08 <0,0001

TRATAMIENTOS 444,40 3 148,13 51,08 <0,0001

Error 46,40 16 2,90

Total 490,80 19

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=3,08141

Error: 2,9000 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T3 14,80 5 0,76 A

T4 15,00 5 0,76 A

T2 23,80 5 0,76 B

T1 24,80 5 0,76 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 7. Análise estatística dos resultados obtidos do desempenho agrônômico do feijão em solo argiloso.

Análisis de la varianza

NUMERO DE VAINAS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NUMERO DE VAINAS	20	0,21	0,07	19,75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,60	3	1,20	1,45	0,2643
TRATAMIENTOS	3,60	3	1,20	1,45	0,2643
Error	13,20	16	0,83		
Total	16,80	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,64353

Error: 0,8250 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T3	4,00	5	0,41	A
T4	4,60	5	0,41	A
T1	4,60	5	0,41	A
T2	5,20	5	0,41	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

LONGITUD DE VAINAS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
LONGITUD DE VAINAS	20	0,07	0,00	9,18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,61	3	0,20	0,43	0,7344
TRATAMIENTOS	0,61	3	0,20	0,43	0,7344
Error	7,57	16	0,47		
Total	8,18	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,24475

Error: 0,4732 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T4	7,32	5	0,31	A
T1	7,39	5	0,31	A
T3	7,46	5	0,31	A
T2	7,78	5	0,31	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

NUMERO DE GRANOS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NUMERO DE GRANOS	20	0,46	0,36	21,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4,15	3	1,38	4,61	0,0165
TRATAMIENTOS	4,15	3	1,38	4,61	0,0165
Error	4,80	16	0,30		
Total	8,95	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,99109

Error: 0,3000 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T4	2,00	5	0,24	A
T1	2,20	5	0,24	A B
T3	3,00	5	0,24	B
T2	3,00	5	0,24	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

PESO DE 100 GRANOS

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
PESO DE 100 GRANOS	20	0,11	0,00	14,39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	20,95	3	6,98	0,63	0,6067
TRATAMIENTOS	20,95	3	6,98	0,63	0,6067
Error	177,60	16	11,10		
Total	198,55	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=6,02854

Error: 11,1000 gl: 16

TRATAMIENTOS Medias n E.E.

T2	21,40	5	1,49	A
T1	23,60	5	1,49	A
T4	23,60	5	1,49	A
T3	24,00	5	1,49	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)