

2026

Hidróxidos e carbonatos na dinâmica do pH do solo: efeitos na microbiota e no desenvolvimento da cultura da soja

Silva, Matheus Hashimoto da

Universidade Estadual do Norte do Paraná

Silva, Matheus Hashimoto da. Hidróxidos e carbonatos na dinâmica do pH do solo: efeitos na microbiota e no desenvolvimento da cultura da soja. Orientador: Marcos Augusto Alves da Silva. 2026. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Campus Luiz Meneghel, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes, 2026.

<https://repositorio.uenp.edu.br/handle/123456789/856>

Baixado de Repositório Institucional UENP



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AGRONOMIA
– PPAGRO

MATHEUS HASHIMOTO DA SILVA

**HIDRÓXIDOS E CARBONATOS NA DINÂMICA DO pH DO
SOLO: EFEITOS NA MICROBIOTA E NO
DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA SOJA**

BANDEIRANTES - PR
2026

MATHEUS HASHIMOTO DA SILVA

**HIDRÓXIDOS E CARBONATOS NA DINÂMICA DO pH DO
SOLO: EFEITOS NA MICROBIOTA E NO DESENVOLVIMENTO
DA CULTURA DA SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em
Agronomia, da Universidade Estadual do Norte do Paraná,
Campus Luiz Meneghel.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Augusto Alves da Silva.

BANDEIRANTES - PR
2026

Ficha catalográfica elaborada na Biblioteca do Campus “Luiz Meneghel”, vinculada ao Sistema de Bibliotecas Universitárias da Universidade Estadual do Norte do Paraná (SBU-UENP)

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Ficha catalográfica elaborada na Biblioteca do Campus “Luiz Meneghel”, vinculada ao Sistema de Bibliotecas Universitárias da Universidade Estadual do Norte do Paraná (SBU-UENP)

Catalogação-na-Publicação (CIP)

S5861h Silva, Matheus Hashimoto da.
Hidróxidos e carbonatos na dinâmica do pH do solo: efeitos na microbiota e no desenvolvimento da cultura da soja. – 2026.
1 arquivo digital.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Augusto Alves da Silva.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Agronomia, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Corretivo de solo - Dissertação. 2. Mistura biológica - Dissertação. 3. Profundidade do solo - Dissertação. 4. Azospirillum brasiliense - Dissertação. 5. Calagem - Dissertação. 6. Carbonato - Dissertação. I. Silva, Marcos Augusto Alves da Silva. II. Universidade Estadual do Norte do Paraná. Campus Luiz Meneghel. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDD: 631.8 (22.ed)

Matheus Hashimoto da Silva

HIDRÓXIDOS E CARBONATOS NA DINÂMICA DO pH DO SOLO: EFEITOS NA MICROBIOTA E NO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA SOJA

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Agronomia da Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Centro de Ciências Agrárias, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Linha de Pesquisa: Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Augusto Alves da Silva

BANCA EXAMINADORA

Dr. Mateus Marrafon Nicolosi (Membro Titular) MAIS MÁQUINA
Prof. Dr. Leopoldo Sussumu Matsumoto (Membro Titular) UENP|CLM
Prof. Dr. Gustavo Dário (Membro Suplente) UENP|CLM
Profa. Dra. Karina Aline Alves (Membro Suplente) IDR-PR

APROVADO EM: 23 de fevereiro de 2026

Prof. Dr. Marcos Augusto Alves da Silva
(Orientador)

Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP)
PPAGRO | Campus Luiz Meneghel

DEDICATÓRIA

A Deus, o princípio, meio e fim.

A Ele, toda a honra e glória!

AGRADECIMENTOS

Imensamente grato a Deus por todas as bênçãos derramadas em minha vida e por ter guiado meus passos com sabedoria, luz e proteção em cada momento da minha jornada.

Aos meus pais, Sr. Eli Pereira da Silva e Sr^a. Elizete Eiko Hashimoto da Silva, expresso minha mais profunda e eterna gratidão. Agradeço por toda cobrança, apoio, incentivo e orientação ao longo da vida. Gratidão aos meus irmãos, Erika Junko Inoue e Marcos Yassuhiro Inoue, pelas dicas, parceria e apoio. À minha companheira, Letícia Kimberlly, pelo incentivo, apoio e compreensão. A toda a minha família, meu sincero reconhecimento pelo suporte e carinho.

Ao meu grande amigo, professor e Engenheiro Agrônomo Welington Polonio, manifesto minha gratidão por seu constante apoio e confiança. Sua generosidade e paciência ao compartilhar seus valiosos ensinamentos foram essenciais para minha formação como engenheiro agrônomo e, agora, como mestre. Seu apoio foi peça-chave!

Ao meu orientador, professor Dr. Marcos Augusto Alves da Silva, e ao meu coorientador, Dr. Mateus Marrafon Nicolosi, expresso minha profunda gratidão pelas valiosas contribuições e ensinamentos, pela generosidade em acolherem o projeto, por abrirem as portas da universidade e por me concederem esta grande oportunidade. Gratidão!

Ao professor Dr. Erich do Reis Duarte, estendo minha profunda admiração e gratidão. Seu apoio incondicional, confiança e incentivo foram pilares essenciais desde os primeiros passos até a conclusão desta jornada.

Aos professores Dr. Diego Rodrigues Resende e Dr. Oriel Tiago Kölln, minha gratidão pela generosidade e pela constante disponibilidade em atender e esclarecer dúvidas.

Ao professor Dr. Leopoldo Sussumu Matsumoto, minha gratidão pela generosidade e pelas contribuições essenciais ao desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também pelo suporte no laboratório, estendido à sua equipe, com grande destaque ao estagiário Anderson Alves dos Santos, pelo grande apoio e dedicação nas análises laboratoriais.

Ao meu grande amigo, Eng. Agrônomo Eduardo Almeida Costa, minha gratidão pela imensurável parceria, apoio constante e dedicação demonstrados na condução desse projeto.

Aos grandes amigos e profissionais de excelência em suas respectivas áreas, Jean C. Eliziário, Everaldo B. Junior, Paulo G. R. de O. Ferreira, Wellington Felipe, Anderson B. da Silva e Guilherme H. da Silva, expresso minha gratidão pela confiança, suporte e apoio demonstrados na condução das atividades. A cooperação é o verdadeiro caminho para o sucesso!

Ao produtor Sr. Sergio de Paula Rodrigues, minha gratidão por ceder a área e os equipamentos indispensáveis para a execução das atividades.

À Sonia Torres, pela disponibilidade, generosidade e grande carinho com que sempre atendeu na secretaria da pós-graduação.

A todos os professores que contribuíram nessa jornada, minha infinita gratidão. A arte de ensinar vai muito além de transmitir conhecimento — é inspirar, transformar e despertar o melhor em cada aluno. Somos, sem dúvida, um pouco de cada professor que tivemos ao longo de nossa vida, levo comigo não apenas o que aprendi, mas também os valores e o exemplo que cada um transmitiu. A vocês, que exercem a mais nobre e importante de todas as profissões, o meu mais sincero reconhecimento!

À CAPES e a Fundação Araucária, gratidão pela concessão das bolsas de mestrado.

Este trabalho é fruto do esforço coletivo de todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para sua realização. Que cada palavra aqui escrita seja reflexo da minha gratidão e reconhecimento.

Obrigado!

“Até o macaco cai da árvore.”

— *Provérbio japonês (Saru mo ki kara ochiru)*

SILVA, Matheus Hashimoto. **Hidróxidos e Carbonatos na Dinâmica do pH do Solo: Efeitos na Microbiota e no desenvolvimento da Cultura da Soja**, 2026. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes-PR, 2026.

RESUMO

Na agricultura, os corretivos de solo desempenham um papel crucial no fornecimento de nutrientes, na correção do pH e na promoção de uma série de benefícios vitais para o bom desenvolvimento das plantas. Nesse contexto, o presente trabalho buscou avaliar a eficiência da correção do pH em diferentes camadas de profundidade do solo na cultura da soja, considerando a aplicação de corretivos compostos por hidróxidos e carbonatos de cálcio e magnésio, com o intuito de determinar os parâmetros mais adequados para o uso desses elementos. Os tratamentos foram organizados em um delineamento de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições, utilizando parcelas de 2,7 m de largura por 5 m de comprimento, totalizando uma área de 13,5 m² por parcela. O ensaio contou com um total de 14 tratamentos, organizados em: testemunha (T1); aplicações de hidróxidos e carbonatos, nas formas grânulo e pó, em doses correspondentes a 50, 100 e 150% da recomendada, todas associadas à mistura biológica (T2 a T13); e um tratamento composto somente pela mistura biológica (T14). A mistura biológica foi composta por *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus aryabhattai*, *Trichoderma sp.*, *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasiliense*, que foram misturados e aplicados sobre o solo 31 dias após a emergência da cultura. Foram consideradas para avaliação as seguintes variáveis: correção do pH nas camadas de 0-10, 0-20 e 20-40 cm de profundidade do solo; alteração nos teores de cálcio, magnésio e fósforo; massa seca do sistema radicular (MSR); massa seca da parte aérea (MSPA); número de vagens por planta (NVP); massa de mil grãos (MMG); produtividade final da cultura (sacas ha⁻¹) e monitoramento das atividades microbiológicas do solo. A aplicação dos hidróxidos proporcionou maior elevação do pH do solo em ambas as camadas de profundidade avaliadas, quando comparada à aplicação dos carbonatos. Aos 45 dias após a aplicação dos corretivos, observou-se que, na camada de 0–10 cm e na maior dose utilizada (1.428 kg ha⁻¹), os hidróxidos elevaram o pH do solo de 4,7 para 5,4, enquanto o carbonato, na mesma dose, promoveu aumento para 4,9. A correção do pH do solo promoveu um ambiente mais favorável à microbiota, aumentando a atividade biológica e a disponibilidade de nutrientes. A melhoria dos componentes químicos e biológicos do solo resultou em maior desenvolvimento radicular e aumento no número de vagens por planta, culminando na elevação da produtividade da cultura da soja.

Palavras-chave: Correção de solo. Disponibilidade de nutrientes. Neutralização de alumínio. Microbiologia do solo.

SILVA, Matheus Hashimoto. **Hydroxides and Carbonates in Soil pH Dynamics: Effects on Microbiota and Soybean Crop Development**, 2026. Master's Dissertation in Agronomy - State University of Northern Paraná, Luiz Meneghel Campus, Bandeirantes-PR, 2026.

ABSTRACT

In agriculture, soil amendments play a crucial role in supplying nutrients, correcting pH, and promoting a range of vital benefits for healthy plant development. In this context, this study aimed to evaluate the efficiency of pH correction at different soil depths in soybean cultivation, considering the application of amendments composed of calcium and magnesium hydroxides and carbonates, in order to determine the most suitable parameters for the use of these elements. The treatments were organized in a randomized complete block design (RCBD) with four replications, using plots of 2.7 m wide by 5 m long, totaling an area of 13.5 m² per plot. The trial included a total of 14 treatments, organized as follows: control (T1); applications of hydroxides and carbonates, in granular and powder form, at doses corresponding to 50, 100, and 150% of the recommended dose, all associated with the biological mixture (T2 to T13); and a treatment composed only of the biological mixture (T14). The biological mixture was composed of *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus aryabhatai*, *Trichoderma sp.*, *Bradyrhizobium japonicum*, and *Azospirillum brasiliense*, which were mixed and applied to the soil 31 days after crop emergence. The following variables were considered for evaluation: pH correction in the 0-10, 0-20, and 20-40 cm soil depth layers; changes in calcium, magnesium, and phosphorus levels; root system dry mass (RSM); shoot dry mass (SDM); number of pods per plant (NPP); thousand-grain weight (TGW); final crop yield (bags ha⁻¹); and monitoring of soil microbiological activities. The application of hydroxides resulted in a greater increase in soil pH in both evaluated depth layers compared to the application of carbonates. Forty-five days after the application of the amendments, it was observed that, in the 0–10 cm layer and at the highest dose used (1,428 kg ha⁻¹), the hydroxides raised the soil pH from 4.7 to 5.4, while carbonate, at the same dose, increased it to 4.9. The correction of the soil pH promoted a more favorable environment for the microbiota, increasing biological activity and nutrient availability. The improvement of the chemical and biological components of the soil resulted in greater root development and an increase in the number of pods per plant, culminating in increased soybean crop productivity.

Keywords: Soil correction. Nutrient availability. Aluminum neutralization. Soil microbiology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Disponibilidade de nutrientes em relação ao pH (Gráfico de Malavolta,1980)	21
Figura 2: Transformações químicas de carbonatos em hidróxidos por calcinação e hidratação.....	24
Figura 3: Diversidade das principais formas de vida encontradas no solo.....	26
Figura 4: Aplicação dos corretivos sobre as parcelas (27 de outubro de 2024)	33
Figura 5: Aplicação da mistura biológica (37 dias após aplicação dos corretivos)	34
Figura 6: Croqui da área experimental.....	35
Figura 7: Pluviosidade acumulada por decêndio e temperaturas médias máximas e mínimas entre a semeadura (26/10/2024) e a colheita (07/03/2025)	36
Figura 8: Coleta de plantas para avaliação.....	36
Figura 9: Retiradas das raízes mais finas e contagem de células colonizadas.....	37
Figura 10: Pesagem e separação das amostras.....	38
Figura 11: Incubação do solo com hidróxido de sódio (NaOH)	41
Figura 12: Secagem e pesagem da parte aérea e sistema radicular.....	43
Figura 13: Colheita e classificação da soja do experimento (07 de março de 2025)	44
Figura 14: Coleta das amostras de solo.....	44
Figura 15: Variação do pH do solo na camada de 0-10 cm, aos 51 dias após a aplicação dos corretivos.....	48
Figura 16: Efeito da dose e granulometria sobre o pH do solo 51 dias após aplicação do corretivo (camada de 0-10 cm)	49
Figura 17: Variação do pH do solo 132 dias após a aplicação dos corretivos.....	50
Figura 18: Efeito da dose e granulometria sobre o pH do solo na camada de 0-20 cm 132 dias após a aplicação dos corretivos.....	51
Figura 19: Correlação entre pH e C_BMS 45 dias após aplicação dos corretivos.....	54
Figura 20: Porcentagem de raízes colonizadas por fungos micorrízico.....	55
Figura 21: Mudanças nos níveis de cálcio e magnésio (132 DAA)	56
Figura 22: Efeito das doses e da granulometria sobre o nível de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-20 cm de profundidade (132 DAA)	57
Figura 23: Níveis de fósforo em diferentes camadas de profundidade do solo (132DAA)	58
Figura 24: Correlação entre pH e Fósforo.....	59
Figura 25: Correlação entre variáveis químicas (pH e V%) e parâmetros fitotécnicos da soja.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos estágios de desenvolvimento da soja (<i>Glycine max</i>)	20
Tabela 2: Características químicas iniciais do solo.....	32
Tabela 3: Organização dos tratamentos.....	35
Tabela 4. Análise dos atributos microbiológicos dos solos no estágio de pleno florescimento da cultura da soja.....	52
Tabela 5: Variáveis vinculadas as condições químicas do solo.....	60
Tabela 6: Parâmetros fitotécnicos da cultura da soja	62
Tabela 7: Análise de rentabilidade econômica parcial em função da aplicação de diferentes doses de hidróxidos e carbonatos.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

DAE – Dias após a Emergência
DAA - Dias Após a Aplicação
M.M.G. – Massa de Mil Grãos
C_BMS - Biomassa de Carbono Microbiano
COT - Carbono Orgânico total
qMIC - Quociente Microbiano
qCO₂ - Quociente Metabólico do Solo
RBS - Respiração Basal do Solo
M.O. – Matéria Orgânica do Solo
P – Fósforo
Na⁺ - Sódio
K⁺- Potássio
Ca²⁺ – Cálcio
Mg²⁺ – Magnésio
Al³⁺ – Alumínio
MgCO₃ - Carbonato de Magnésio
CaCO₃ - Carbonato de Cálcio
CaO – Óxido de Cálcio
MgO – Óxido de Magnésio
Ca (OH)₂ - Hidróxido de Cálcio
Mg (OH)₂ - Hidróxido de Magnésio
H + Al – Acidez potencial
CTC – Capacidade de Troca Catiônica
V% - Saturação de Base
Kg – Quilogramas
mm - Milímetros
MMG – Massa de Mil Grãos
MSR – Massa Seca das Raízes
MSPA – Massa Seca da Parte Aérea
MMG – Massa de Mil Grãos
NVP – Número de Vagens por Planta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 História e produção da soja no Brasil	18
2.2 Descrição morfológica e estádios fenológicos da cultura da soja.....	19
2.3 Impactos do pH do solo na disponibilidade de nutrientes e a eficiência da calagem	21
2.4 Origem dos óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio	24
2.5 Granulometria dos corretivos.....	24
2.6 Diversidade microbiológica do solo e sua suscetibilidade ao manejo agrícola.....	25
2.7 Micorrizas arbusculares: interações mutualistas e condições químicas do solo.....	27
2.8 Bioinsumos na agricultura e a influência das condições do solo na eficiência microbiana	28
3. JUSTIFICATIVA.....	30
4. OBJETIVOS.....	31
4.1 Objetivo geral.....	31
4.2 Objetivos específicos.....	31
5. HIPÓTESES.....	31
6. MATERIAL E MÉTODOS	31
6.1 Caracterização do experimento	31
6.2 Implantação e condução do experimento.....	32
6.3 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos	34
6.4 Descrição climática ao longo do experimento.....	35
7. Avaliações e análises 45 dias após a aplicação (Cultura em estádio R1)	36
7.1 Avaliação da colonização micorrízica nas raízes.....	36
7.2 Coleta de solo para determinação de parâmetros microbiológicos e pH.....	38
7.2.1 Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (C_BMS)	39
7.2.2 Determinação da Respiração Basal do Solo (RBS)	41
7.2.3 Determinação do Carbono Orgânico Total (COT).....	42
7.2.4 Determinação do Quociente Metabólico do solo (qCO_2)	42
7.2.5 Determinação do Quociente Microbiano ($qMIC$)	43
7.2.6 Massa seca da raiz e parte aérea.....	43
7.3 Avaliações de final de ciclo	44
7.3.1 Massa de mil grãos (MMG) e produtividade	44
7.3.2 Análise Química do solo (pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} e P)	45
7.3.3 Determinação da Saturação por bases.....	47

7.3.4 Estimativa dos preços dos corretivos e da saca de soja	47
8. ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	47
9. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
9.1 Efeito dos corretivos sobre pH do solo.....	48
9.2 Avaliação dos atributos microbiológicos do solo (soja em estágio R1)	51
9.3 Avaliação dos níveis de cálcio e magnésio no solo (132 dias após aplicação dos corretivos)	56
9.4 Disponibilidade de fósforo no solo.....	57
9.5 Variáveis químicas do solo (H + Al, T, SB e V%)	59
9.6 Características morfológicas quantitativas relacionadas ao crescimento e à produtividade	61
9.7 Análise de rentabilidade parcial	63
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

No cenário global, a agricultura desempenha papel fundamental para o fomento econômico e social. Atualmente, o Brasil se destaca na produção agrícola, com uma produção de grãos estimada em 332,9 milhões de toneladas, sendo a soja amplamente reconhecida como uma das principais commodities, tornando o país o maior produtor mundial da oleaginosa, alcançando uma produção estimada em 171,5 milhões de toneladas na safra 2024/2025, a maior já registrada na história para o grão (CONAB, 2025).

A soja está presente em todas as regiões brasileiras, o acentuado crescimento da cultura nas últimas décadas está ligado aos avanços científicos e a disponibilização de tecnologias ao setor produtivo. A introdução da mecanização e o desenvolvimento de variedades altamente produtivas adaptadas a diferentes regiões, juntamente com avanços em pacotes tecnológicos relacionados ao manejo do solo, adubação, correção de acidez, controle de pragas e doenças, bem como a identificação e resolução dos principais fatores que levam a perdas durante a colheita, são elementos impulsionadores desse progresso (Freitas, 2011).

O aumento contínuo da demanda mundial por alimentos, juntamente com as restrições de expansão das áreas agrícolas disponíveis, evidencia a necessidade de pesquisas voltadas para a preservação do solo e a maximização do aproveitamento das áreas já cultivadas. O solo é um pilar determinante para o sucesso ou fracasso de uma lavoura, por meio dele, a planta obtém a maior parte dos nutrientes para seu desenvolvimento. Corrigi-lo é uma etapa fundamental que deve ser realizada, considerando a acidez presente nos solos, que pode limitar o potencial produtivo das lavouras (Saath; Fachinello, 2018).

A acidez do solo pode ser classificada em duas formas, sendo acidez ativa, que diz respeito à quantidade de íons de hidrogênio (H^+) que estão livres na solução do solo, influenciando diretamente o pH, e acidez potencial que está associada aos íons de alumínio e hidrogênio permanecem na fase sólida, não dissociada (Veloso *et al.* 2020). A adoção de práticas de correção de solo é fundamental para melhor aproveitamento de nutrientes, já que os solos das regiões tropicais e subtropicais apresentam acidez natural elevada e teores significativos de alumínio trocável (Ciotta *et al.*, 2004). O intuito é elevar o pH do solo para valores entre 5,5 e 6,0, considerados ideais (Malavolta, 1981), bem como aumentar os teores de cálcio e magnésio na saturação por bases (V%), visando à neutralização dos efeitos tóxicos do alumínio e do manganês (Brasil; Cravo; Veigas, 2020).

Em sistemas de plantio direto (SPD), a aplicação superficial de calcário ($CaCO_3$ e $MgCO_3$) tem se tornado cada vez mais relevante, devido aos seus benefícios na preservação da palhada disposta na superfície do solo, a qual contribui para a proteção física, manutenção da umidade e temperatura,

além de reduzir os riscos de erosão, entretanto, a eficácia desse método é fortemente influenciada pelas características físico-químicas do solo. Quando aplicados na superfície em sistemas de plantio direto, o calcário (CaCO_3 e MgCO_3) tendem a ter seus efeitos concentrados em uma camada superficial do solo (Gonzalez-Erico *et al.* 1979) assim, ao longo do tempo, pode-se gerar um desequilíbrio nessa camada, caracterizando o fenômeno conhecido como “supercalagem”, provocando limitações na disponibilidade e absorção de nutrientes, tais como P, Zn, Fe, Cu e Mn, assim como na taxa de mineralização da matéria orgânica do solo (Souza *et al.* 2007). Considerando a calagem utilizando o carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3) que possuem baixa solubilidade e mobilidade no perfil do solo torna-se necessária a adoção de práticas de incorporação (Nobile *et al.* 2021), o que eleva o custo de produção e elimina a palhada benéfica acumulada na superfície do solo ao longo das safras.

Devido aos problemas operacionais que complicam a utilização dos carbonatos (CaCO_3 e MgCO_3), torna-se essencial a busca por corretivos que possuem maior solubilidade e alto poder de translocação no perfil solo, tornando a operação de correção mais rápida e eficiente, sem a necessidade de práticas de incorporação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 História e produção da soja no Brasil

A introdução da soja no Brasil remonta ao ano de 1882, tendo como local inicial o estado da Bahia (BA). Franz Daffert, que atuou como primeiro diretor do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), liderou a iniciativa de implantar o cultivo inicial da soja no estado de São Paulo (IAC, 2000). Embora o primeiro cultivo comercial da soja no Brasil tenha ocorrido em 1914, no município de Santa Rosa, no estado do Rio Grande do Sul (RS), a cultura somente começou a adquirir relevância econômica a partir do final da década de 1940. O ano de 1941 é destacado como o marco inicial do registro estatístico nacional da produção de soja, com um volume registrado de 457 toneladas (Dall’Agnol, 2016).

Durante a década de 1950, a produção nacional de soja alcançou o patamar de 100 mil toneladas. Na década seguinte, a cultura consolidou-se como um elemento de significativa importância econômica. O volume total de produção passou de 206 mil toneladas em 1960 para expressivos 1,06 milhão de toneladas em 1969. Nesse intervalo, cerca de 98% da produção nacional estava concentrada nos estados da região Sul do Brasil, onde predominava o sistema de cultivo rotacional, sendo o trigo cultivado durante o inverno e a soja no verão (Dall’Agnol, 2011).

No decorrer das décadas, a soja tornou-se a cultura que mais cresceu no país sendo cultivada em todas as regiões do Brasil, impulsionada por sua alta demanda comercial para a alimentação humana e animal (CONAB, 2016). Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial do grão, com uma área cultivada de 47,61 milhões de hectares. O estado de Mato Grosso lidera tanto em produção quanto em área plantada, seguido por Paraná, Goiás e Rio Grande do Sul. A produção da oleaginosa na safra 2024/2025 foi estimada em 171,5 milhões de toneladas, alcançando um recorde histórico, com a maior produtividade média já registrada no país alcançando 3.621 kg ha⁻¹ (CONAB 2025).

2.2 Descrição morfológica e estádios fenológicos da cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), originária da Ásia, é uma planta herbácea pertencente à classe Rosidae, família Fabaceae e subfamília Papilionoideae (Embrapa, 1979). As principais variedades comerciais de soja apresentam caule híspido, com baixa ramificação, e raiz pivotante com numerosas ramificações secundárias. As folhas são trifolioladas, exceto pelo primeiro par de folhas simples, localizado no nó imediatamente acima do cotilédone. As flores, autógamas e típicas da subfamília Papilionoideae, apresentam coloração branca, roxa ou intermediária. As vagens, levemente arqueadas, mudam de coloração à medida que amadurecem, passando do verde para tons de amarelo-pálido, marrom-claro, marrom ou cinza. Cada vagem pode conter de uma a cinco sementes, que variam entre formas elípticas e globosas, com tegumento amarelo-pálido e hilo de coloração preta, marrom ou amarelo-palha (Embrapa, 2021).

A compreensão da fenologia da soja possibilita a identificação e classificação dos estádios de desenvolvimento da cultura (Tabela 1), permitindo relacioná-los com suas exigências específicas ao longo do ciclo. O sistema desenvolvido por Fehr e Caviness (1977) organiza o crescimento da planta em estádios vegetativos, indicados pela letra V, e estádios reprodutivos, indicados pela letra R. Excetuando-se os estádios VE (emergência) e VC (cotilédone), os códigos V e R são acompanhados de números que especificam cada fase particular do desenvolvimento da planta nessas duas etapas (Embrapa, 2021).

Tabela 1: Descrição dos estágios de desenvolvimento da soja (*Glycine max*).

	Estádio	Descrição
Vegetativo	VE	Emergência
	VC	Cotilédones completamente abertos
	V1	Folhas unifolioladas desenvolvidas (1° nó)
	V2	Primeiro trifólio desenvolvido (2° nó)
	V3	Segundo trifólio desenvolvido (3° nó)
	V4	Terceiro trifólio desenvolvido (4° nó)
	V5	Quarto trifólio desenvolvido (5° nó).
	V6	Quinto trifólio desenvolvido (6° nó)
	VN	Ante-enésima folha trifoliolada desenvolvida (Enésimo nó)
Reprodutivo	R1	Início do florescimento
	R2	Florescimento pleno
	R3	Início da formação de vagens
	R4	Vagens completamente desenvolvidas
	R5	Início do enchimento de grãos
	R6	Grãos completamente desenvolvidos
	R7	Início da maturação
	R8	Maturação plena

Fonte: Adaptado de Neumaier *et al.* (2001).

Segundo Zanon *et al.* (2018) as diversas cultivares existentes podem apresentar diferentes tipos de crescimento, classificados como: determinado, semideterminado e indeterminado. As cultivares de crescimento determinado destacam-se pela ausência ou pequena expansão em altura após o início da floração. Por outro lado, as plantas de crescimento indeterminado continuam a formar nós e a estender a haste após o estágio R1, promovendo um aumento significativo na altura e na quantidade de nós até o início do enchimento dos grãos. Já as cultivares de crescimento semideterminado apresentam características intermediárias entre os tipos determinado e indeterminado.

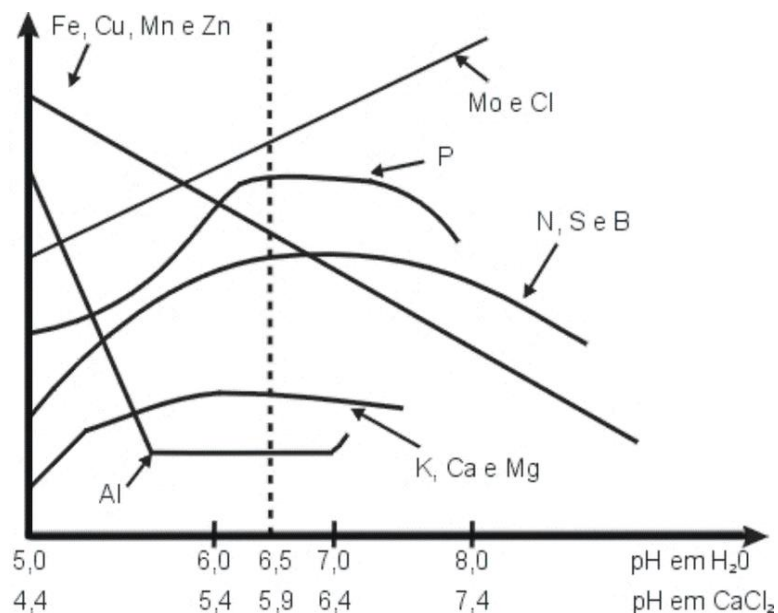
O crescimento e o desenvolvimento das plantas de soja são influenciados pela interação entre o potencial genético de uma cultivar específica e as condições ambientais em que está inserida. O ambiente ou clima exerce um papel determinante na produtividade das culturas agrícolas e no desempenho dos sistemas de produção. No Brasil, os principais fatores que geram variabilidade na produção da soja estão relacionados às condições climáticas, especialmente em sistemas de cultivo que não utilizam sistemas de irrigação. Além da precipitação, elementos meteorológicos como a radiação solar, a temperatura e o fotoperíodo impactam diretamente no crescimento, desenvolvimento e a definição do potencial produtivo da cultura (Zanon *et al.*, 2018).

2.3 Impactos do pH do solo na disponibilidade de nutrientes e a eficiência da calagem

O Brasil é grande produtor e exportador de commodities agrícolas, possuindo vastas áreas propícias para cultivo e produção, no entanto, o manejo inadequado do solo tem sido um fator limitante de produção. Os solos brasileiros são caracterizados por apresentarem acidez elevada, resultante principalmente das altas concentrações de alumínio (Al), e manganês (Mn) presentes na solução do solo. A acidez estimula o surgimento de elementos nocivos ao crescimento e desenvolvimento das plantas, além de indisponibilizar nutrientes fundamentais que estão presentes na solução do solo (Martins, 2005).

O potencial hidrogeniônico (pH) é uma escala determinada pela concentração de íons de hidrogênio (H^+) presentes no solo, essa escala varia de 0 a 14, sendo que valores abaixo de 7 indicam acidez, valores iguais a 7 indicam neutralidade e valores superiores a 7 indicam solos alcalinos. Os problemas gerados pela acidez são geralmente corrigidos pela calagem, que reduz e elimina o efeito tóxico de alumínio (Al) e manganês (Mn), aumenta a disponibilidade de nutrientes, e melhorando a atividade microbiana do solo, podendo ser considerada a prática que mais potencializa a eficiência dos fertilizantes aplicados ao solo (Caires; Joris, 2016). A Figura 1 mostra a disponibilidade de macro e micronutrientes de acordo com o pH do solo.

Figura 1: Disponibilidade de nutrientes em relação ao pH.



Fonte: Malavolta, 2006.

As rochas calcárias moídas que contém carbonatos de cálcio (CaCO_3) e/ou de magnésio (MgCO_3) são comumente os corretivos mais utilizados na agricultura. A interação entre a água (H_2O) e gás carbônico (CO_2) com os carbonatos (CaCO_3 e MgCO_3) resulta nas seguintes reações:

- Carbonatos de cálcio (CaCO_3): $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$.
- Carbonatos de magnésio (MgCO_3): $\text{MgCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$.

Dessa maneira, a hidroxila (OH^-) reage com os íons de hidrogênio (H^+) e alumínio (Al^{3+}) presentes na solução do solo, formando água (H_2O) e hidróxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$ que dessa maneira é precipitado no perfil do solo. O bicarbonato (HCO_3^-) também reage com hidrogênio (H^+) formando gás carbônico (CO_2) e água (H_2O) (Caires; Joris, 2016).

Quando aplicado na superfície do solo em sistema de plantio direto, o calcário tende a ter seus efeitos restritos à camada superficial devido à sua relativa imobilidade no perfil do solo (Gonzalez et al., 1979; Miyazawa; Pavan; Franchini, 2000). Dessa maneira, ao longo do tempo, haverá um acúmulo de produtos resultantes da solubilização do calcário na superfície do solo, o que pode ocasionar uma elevação excessiva do pH, levando à indisponibilização de diversos nutrientes, como P, Zn, Fe, Cu e Mn. Além disso, pode acelerar a mineralização da matéria orgânica, tornando essa condição tão prejudicial quanto a acidez elevada, com o agravante de ser muito difícil de corrigir e retornar o pH a condições adequadas (Quaggio, 2000; Souza; Miranda; Oliveira, 2007).

Segundo Quaggio (2000), a correção de acidez do solo provoca a mineralização mais intensa da matéria orgânica do solo, apesar de seu conteúdo não alterar ao longo do tempo, devido a maior produção de biomassa pelas culturas em solos com pH corrigido. Durante o processo de mineralização, são formados ânions como NO_3^- e SO_4^{2-} , que permanecem predominantemente na solução do solo. Quando ocorre movimento descendente de água no perfil, esses ânions podem ser lixiviados e, para manter o equilíbrio eletroquímico da solução, cátions como Ca^{2+} e Mg^{2+} acompanham esse processo, podendo resultar em perdas desses nutrientes.

Diante disso, o conhecimento das necessidades nutricionais da cultura e das características dos corretivos, bem como a correta quantificação de suas doses, é fundamental para um manejo eficiente da acidez do solo. Conforme o Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná, a saturação por bases recomendada para a cultura da soja é de 60%. O cálculo da necessidade de calcário, baseado na elevação da saturação por bases (V%), requer o conhecimento do poder relativo de neutralização total (PRNT) do corretivo, bem como das condições químicas do solo. O PRNT engloba valores de poder neutralizante (PN) e reatividade (RE), e expressa o potencial da pureza que exerce sua ação num período de 3 meses ($\text{PRNT} = \text{PN} \times \text{RE} / 100$). O poder neutralizante (PN) refere-se à capacidade do calcário de neutralizar a acidez do solo, é expresso em porcentagem de carbonato de cálcio equivalente (CaCO_3). Quanto maior o valor de PN, maior é a capacidade do calcário de

neutralizar a acidez do solo. A reatividade eficaz (RE), é uma medida da velocidade com que o calcário reage no solo para corrigir sua acidez. O RE é determinado pela finura das partículas de calcário e pela solubilidade do material (Giraldeli, 2019).

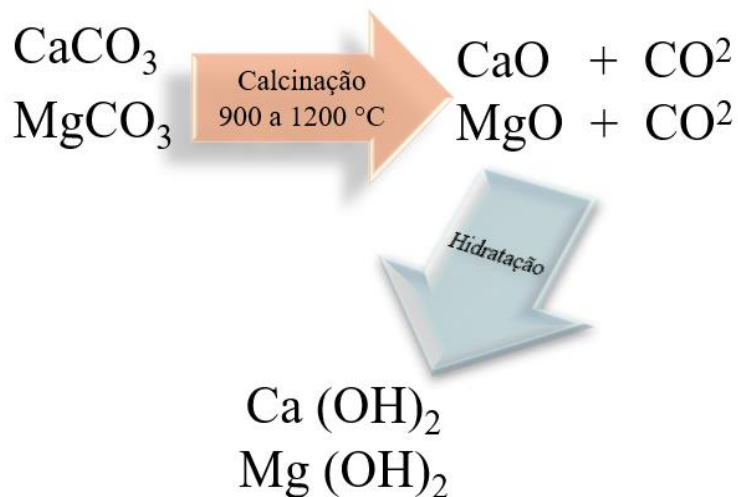
2.4 Origem dos óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio

Os óxidos são quimicamente diferentes dos corretivos comuns (carbonatos), e tem ganhado notoriedade, por sua grande capacidade no fornecimento de nutrientes (Ca e Mg) e pela sua alta reatividade quando em contato com a umidade presente no solo. O óxido de cálcio (CaO), também conhecido como cal virgem, possui alta solubilidade em água, reagindo mais rápido na correção do pH e neutralização de alumínio. Os óxidos de cálcio (CaO), magnésio (MgO), potássio (K₂O) e o óxido de fósforo (P₂O₅), são bastante utilizados na produção agrícola, e desempenham papéis fundamentais na correção de solo, e no equilíbrio nutricional necessário para um bom desenvolvimento da cultura (Silva, 2023).

Os óxidos apresentam-se na forma de um pó fino e branco, com grandes concentrações de cálcio e magnésio e alto poder de neutralização (PN). São obtidos através de um processo chamado de calcinação ou queima do calcário, durante esse processo o carbonato de cálcio (CaCO₃) é aquecido a temperaturas que variam entre 900 a 1.200 °C em fornos específicos, resultando na decomposição térmica do dióxido de carbono (CaCO₃ →^{calcinação} CaO + CO₂), levando a formação dos óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO), que são os principais óxidos utilizados para correção de solo (Soares, 2007).

Ao entrar em contato com a água (H₂O), a cal virgem libera: Ca²⁺, OH⁻ e calor (CaO + H₂O → Ca (OH)² + calor); a liberação de OH⁻ é imediata e total, o que confere ao produto caráter de base forte, e o OH⁻ produzido reage e neutraliza o hidrogênio presente na solução do solo (H⁺) responsável pela sua acidez (Alcarde, 2005).

Figura 2: Transformações químicas de carbonatos em hidróxidos por calcinação e hidratação



Fonte: do autor, 2025.

Comumente conhecidos como cal apagada, os hidróxidos são obtidos pela reação dos óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) com água, conforme a seguinte equação química: CaO (óxido de cálcio) ou MgO (óxido de magnésio) + H₂O → Ca (OH)₂ (hidróxido de cálcio) e Mg (OH)₂ (hidróxido de magnésio). Esse processo, conhecido como hidratação, transforma os óxidos em hidróxidos, que possuem diversas aplicações, incluindo o uso na correção do pH do solo (Coelho, 1973).

2.5 Granulometria dos corretivos

Nos últimos anos corretivos granulados à base de óxidos, hidróxidos e até mesmo carbonatos de cálcio e magnésio, como o calcário tipo filler granulado ou o calcário nano particulado vem ganhando notoriedade no mercado agrícola devido à sua maior facilidade de aplicação e uniformidade na distribuição a lanço (Barth *et al.* 2018). Entretanto, o processo de granulação pode reduzir a reatividade do material, uma vez que as partículas finas são aglomeradas, diminuindo a área de contato efetiva com o solo e, conseqüentemente, a velocidade de reação. Essa característica faz com que os corretivos granulados apresentem efeito corretivo mais lento, sendo indicados principalmente para manutenção da acidez em áreas já corrigidas ou para uso em sistemas de plantio direto, nos quais a incorporação do material não é possível.

A eficiência dos corretivos de solo está diretamente relacionada às suas características químicas e físicas, especialmente à granulometria. O tamanho das partículas exerce forte influência sobre a velocidade de reação no solo, neutralização de elementos tóxicos, como o alumínio, e a elevação do pH. Partículas mais finas tendem a reagir mais rapidamente no solo, enquanto partículas

mais grossas apresentam ação residual mais prolongada. Segundo Pandolfo e Tedesco (1996) corretivos mais finamente moídos apresentam maior área superficial específica, o que proporciona um contato maior com a solução do solo. Essa maior superfície de reação favorece uma dissolução mais rápida. Por outro lado, partículas com maior diâmetro possuem menor área de contato com o solo, o que reduz a taxa de dissolução e retarda o efeito corretivo a curto prazo, embora possam apresentar ação residual mais prolongada devido à sua dissolução gradual ao longo do tempo (Mello *et al.*, 2003).

Além disso, a escolha entre corretivos granulados e em pó deve considerar fatores como o sistema de manejo, o tipo de solo, a urgência da correção e o custo-benefício. Enquanto os produtos com menores diâmetros de partículas são mais eficientes em reações rápidas, os granulados oferecem vantagens logísticas e operacionais, possibilitando aplicações mais precisas e com menor perda por deriva.

2.6 Diversidade microbiológica do solo e sua suscetibilidade ao manejo agrícola

O solo é vital para o funcionamento do ecossistema terrestre, além de ser a base para a produção agropecuária. Os microrganismos presentes em seu meio, em conjunto com a biota total, são um dos cinco fatores que compõem a formação do solo; os outros quatro são: clima, topografia, material parental e tempo. Cerca de dois terços de toda a biodiversidade do planeta está concentrada no solo (Bald *et al.*, 2021).

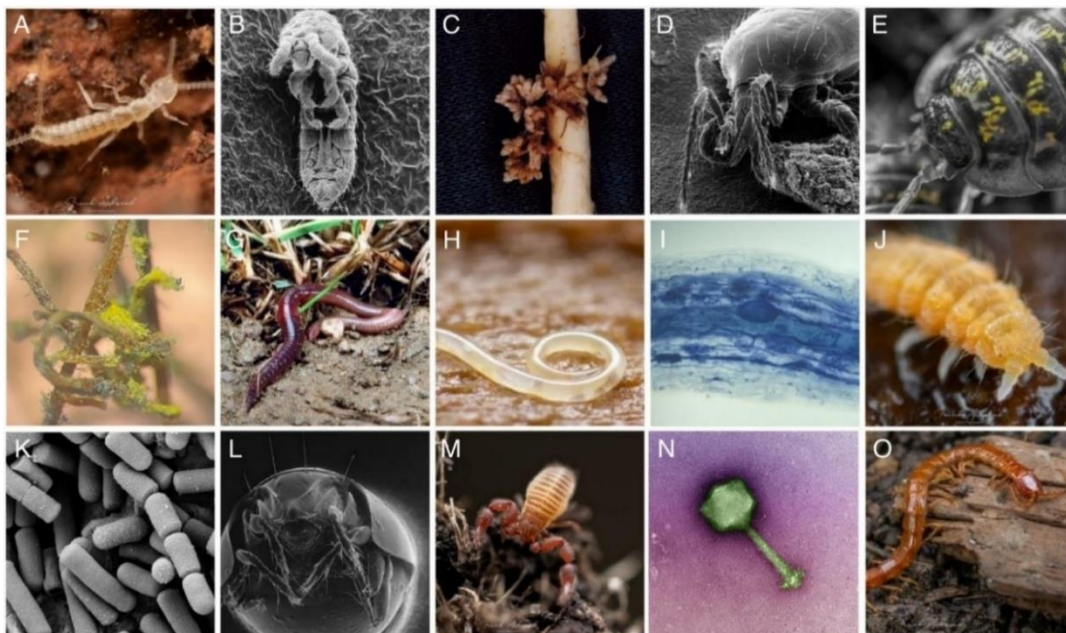
Toda essa biodiversidade é fortemente influenciada pelos diferentes sistemas de manejo adotados. O sistema de plantio direto, em especial, cria condições altamente favoráveis ao desenvolvimento dos microrganismos presentes na camada superficial do solo. Esse sistema é fundamentado no aumento do teor de matéria orgânica, o que intensifica a atividade microbiana, essencial para a manutenção da fertilidade do solo. Além disso, a redução das operações mecânicas no solo contribui para minimizar os impactos negativos causados por fatores ambientais adversos. A biomassa microbiana do solo, que representa a quantidade de carbono presente na forma de organismos vivos, normalmente apresenta maior atividade no sistema de plantio direto em comparação ao sistema convencional (Schneider, 2007).

No sistema de plantio direto, há maior retenção de carbono e nitrogênio orgânicos no solo, além de uma preservação mais acentuada do material orgânico na superfície, o que contribui para a manutenção da umidade e para a estabilidade térmica do solo. A adoção de estratégias de manejo, como a rotação de culturas, resulta em um aumento na diversidade da fauna de microrganismos do solo (Venzke Filho, 2003). Nesse contexto, o uso de corretivos de acidez do solo, como os carbonatos, hidróxidos e óxidos de cálcio e magnésio, entre outros, têm como principal função elevar o pH do

solo, reduzindo a acidez e criando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das plantas e dos microrganismos. Ao neutralizarem o excesso de íons H^+ e Al^{3+} do solo, esses materiais promovem alterações químicas que afetam diretamente a microbiota, uma vez que o pH influencia a disponibilidade de nutrientes, a atividade enzimática e a composição das comunidades microbianas (Oliveira, 2004).

Com a melhoria das condições químicas e biológicas do solo, proporcionada tanto pelo manejo adequado quanto pela correção da acidez, estabelece-se um ambiente propício para o desenvolvimento de uma ampla diversidade de organismos que intensificam processos essenciais como a decomposição da matéria orgânica, a mineralização e a ciclagem de nutrientes, contribuindo diretamente para o aumento da fertilidade do solo. Nesse cenário, os fungos lideram entre os organismos com maior presença nesse ambiente, com aproximadamente 90% de suas espécies vivendo no solo. Em seguida, vêm as plantas, das quais 86% estão associadas ao solo, principalmente por meio de suas raízes. Já os invertebrados como minhocas e moluscos, incluindo os caracóis, correspondem a cerca de 20% das espécies que habitam esse meio (Anthony *et al.*, 2023).

Figura 3: Diversidade das principais formas de vida encontradas no solo



(A) Rabo de cerda (© F. Ashwood); (B) Colêmbolo (© H. Conrad); (C) Nódulos contendo bactérias fixadoras de nitrogênio na raiz do trevo (© M. van der Heijden); (D) Ácaro predador (© H. Conrad); (E) Isópode (© F. Ashwood); (F) Raiz de pinheiro silvestre colonizada por fungos ectomicorrízicos – em amarelo (© M. Anthony); (G) Minhoca (© G. Brändle); (H) Nematóide (© A. Murray); (I) Raiz de milho colonizada por fungos micorrízicos arbusculares – em azul (© F. Bender); (J) Colêmbolo (© F. Ashwood); (K) Bactéria do solo *Bacillus* (Creative Commons Attribution-Share, foto de M. Das Murtey e P. Ramasamy); (L) Ácaro com chifres (© H. Conrad); (M) Pseudoescorpião (© F. Ashwood); (N) Fago infectando bactéria do solo (© T. de Carvalho); (O) Centopeia (© F. Ashwood).

Fonte: Anthony *et al.*, 2023.

A microbiota, desempenha papel fundamental no desenvolvimento das plantas, sendo responsável pela mineralização da matéria orgânica, ciclagem e transporte de nutrientes, síntese de proteínas e ácidos nucleicos, fixação biológica de nitrogênio (FBN), promoção de crescimento, retenção de água e sequestro de carbono; os microrganismos presentes na rizosfera melhoram a saúde das plantas e podem protegê-las contra o ataque de patógenos. Através da excreção de substâncias capazes de cimentar agregados, os microrganismos também desempenham papel importante na estruturação física do solo. O manejo agrícola influencia no tamanho e na atividade da população microbiana do solo. Manter o equilíbrio das características físicas, químicas e biológicas do solo é de extrema importância para que a cultura possa expressar seu máximo potencial produtivo (Chen *et al.* 2024).

A microbiota do solo é altamente sensível às variações ambientais, sendo influenciada por todas as atividades humanas realizadas nos agrossistemas, impactando diretamente sua qualidade, que pode ser monitorada por meio de bioindicadores. Considerando que o microbioma do solo exerce influência direta e indireta sobre a produtividade agrícola, compreender os processos nos quais a biomassa microbiana está envolvida torna-se fundamental para a realização de um manejo eficiente do solo, visando à sua máxima produtividade e conservação (Vargas; Scholles, 2000).

2.7 Micorrizas arbusculares: interações mutualistas e condições químicas do solo

Grande parte das culturas agrícolas apresenta raízes naturalmente colonizadas por fungos micorrízicos arbusculares, cuja presença pode ser influenciada por práticas como preparo do solo, aplicações de corretivos, adubação, plantio direto, adubação verde e rotação de culturas. Nesse contexto, o desenvolvimento e a colonização de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são fortemente influenciados pelas propriedades químicas do solo, especialmente pelo pH e pela disponibilidade de nutrientes. A aplicação de corretivos de acidez, como óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio, exerce efeito direto sobre o ambiente radicular, promovendo condições mais favoráveis para a proliferação e atividade das micorrizas. Ao elevar o pH do solo e neutralizar o excesso de íons H^+ e Al^{3+} , esses corretivos reduzem a toxicidade para os microrganismos e aumentam a disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo, zinco e cobre, os quais são captados com maior eficiência pelas hifas micorrízicas. Além disso, a melhoria das condições químicas do solo favorece a germinação de esporos e a formação de estruturas fúngicas, como arbúsculos e vesículas, ampliando a área de exploração radicular e potencializando o efeito mutualista das micorrizas sobre as plantas (Clark, 1997; Gomes *et al.*, 2011; Fang *et al.*, 2023).

As plantas e os microrganismos estabelecem uma variedade de interações simbióticas, que podem variar desde o parasitismo até o mutualismo. Um exemplo notável são as micorrizas arbusculares (MAs), resultantes da associação entre as raízes das plantas e fungos pertencentes ao filo Glomeromycota. Essas interações simbióticas possuem caráter mutualista e estão presentes em mais de 80% das plantas vasculares (Smith; Read, 1997).

Com base na morfoanatomia, as micorrizas podem ser classificadas em ectomicorrizas, ectoendomicorrizas e endomicorrizas. Esses fungos estabelecem associações caracterizadas pela penetração inter e intracelular das hifas, formando estruturas fúngicas, como arbúsculos e vesículas, no córtex das raízes. Sendo simbiontes obrigatórios, desempenham um papel essencial no desenvolvimento das plantas. O maior volume de solo explorado pelas micorrizas resulta em um aumento significativo na absorção de nutrientes, como fósforo, zinco e cobre, especialmente em solos com baixa disponibilidade desses elementos (Antoniolli; Kaminski, 1991).

Classificação das micorrizas baseada em sua morfologia e anatomia (Siqueira; Franco, 1988):

- Endomicorrizas: Também conhecidas como fungos micorrízicos arbusculares (FMA), são as mais comuns. Suas hifas penetram nas células corticais das raízes sem causar deformações ou formar um manto externo de hifas. Esses fungos promovem a absorção de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo, zinco e cobre, além de contribuir para a fixação biológica de nitrogênio e aumentar a tolerância da planta a diversos tipos de estresse. Esse tipo de micorriza ocorre na maioria das plantas cultivadas, incluindo soja, milho, trigo, feijão, arroz, cana-de-açúcar, batata, café, tomate e grande parte das culturas agrícolas tropicais (Maarja Öpik *et al.*, 2010).
- Ectomicorrizas: Caracterizam-se pelo crescimento intercelular das hifas, formando um manto ao redor da raiz, sem penetração direta nas células. Esse tipo de micorriza auxilia na absorção de nitrogênio e fósforo, além de conferir maior resistência a estresses bióticos (como doenças) e abióticos (como seca e frio). São mais comuns em espécies florestais arbóreas, especialmente em árvores como eucalipto, pinus, carvalho, castanheira e faia (Brundrett, 2009).
- Ectoendomicorrizas: Apresentam características intermediárias entre ecto e endomicorrizas, combinando aspectos estruturais e funcionais de ambos os grupos. Ocorrem principalmente em plantas de ambientes florestais, especialmente em espécies da família Ericaceae (Brundrett, 2009).

2.8 Bioinsumos na agricultura e a influência das condições do solo na eficiência microbiana

Devido aos inúmeros benefícios diretos e indiretos, que englobam controle de pragas e doenças, na fertilidade do solo e na promoção do crescimento das plantas, os bioinsumos têm ganhado destaque na agricultura, com o mercado global de biopesticidas apresentando um crescimento anual

de aproximadamente 15% (Landgraf, 2020). A eficiência desses bioinsumos está diretamente relacionada às condições químicas do solo, uma vez que ambientes com pH muito ácido podem reduzir a sobrevivência e o desempenho de microrganismos benéficos, como bactérias do gênero *Bacillus* e bactérias fixadoras de nitrogênio, limitando o crescimento e a colonização do sistema radicular (Moreira; Siqueira, 2006).

A aplicação de corretivos de acidez, promovem melhorias nas condições químicas do solo, principalmente pelo aumento do pH e pela neutralização do alumínio tóxico (Al^{3+}) (Raij, 2011). Essas alterações químicas impactam diretamente a atividade microbiana e a eficiência dos bioinsumos aplicados na lavoura (Carneiro *et al.*, 2009). Além disso, a disponibilidade de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) (provenientes desses corretivos) também influencia processos biológicos. O cálcio atua na estabilização da parede celular de microrganismos e na formação de agregados do solo, o que melhora a aeração, infiltração de água e o microambiente da rizosfera, já o magnésio participa de rotas metabólicas essenciais tanto para plantas quanto para microrganismos simbióticos (Epstein; Bloom, 2006).

Dentre a vasta diversidade, as bactérias do gênero *Bacillus* ganham destaque, sendo as mais utilizadas em manejos biológicos, essas bactérias Gram positivas são encontradas em todas as partes do planeta incluindo solo, rizosfera, superfície de plantas, insetos mortos e grãos armazenados (Monnerat *et al.*, 2020).

Além das populares bactérias, a utilização de fungos também fomenta o mercado de bioinsumos. Fungos do gênero *Trichoderma* são um dos agentes mais estudados e utilizados na agricultura mundial, pois, além de auxiliarem na proteção de plantas contra diversos patógenos, não são nocivos à saúde humana. O gênero *Trichoderma* ganha destaque no controle de *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Verticillium*, *Phytophthora*, *Pythium*, *Armillaria* e *Roselinia*, que são patógenos de solo, ou seja, fungos que vivem no solo e infectam raízes, base dos caules, e o sistema vascular das plantas, causando sintomas como podridões, murchas e morte das plantas (Lucon; Chaves; Bacilieri, 2014).

Para o sucesso do manejo utilizando bioinsumos é imprescindível um vasto entendimento dos alvos biológicos a serem controlados e adotar a melhor estratégia para atingi-los. Quando o problema envolve questões relacionadas ao solo, como nutrição, fungos e nematoides, a aplicação e a interação biológica devem ocorrer no solo, seja por meio do tratamento de sementes ou, preferencialmente, com aplicação no sulco de semeadura (Meyer, *et al.*, 2022).

Além do controle de pragas e doenças a inoculação de algumas bactérias reduzem significativamente a necessidade da adubação nitrogenada. Plantas leguminosas, como feijão, alfafa, grão-de-bico, soja, entre outras, apresentam um mecanismo simbiótico mais sofisticado e têm a

capacidade de se associar com bactérias diazotróficas que formam nódulos em suas raízes, onde se estabelecem e têm a aptidão de captar nitrogênio atmosférico (N_2) e transformá-lo em amônia (NH_3) por meio da ação da enzima nitrogenase (Döbereiner, 1990).

3. JUSTIFICATIVA

O solo constitui a base para o êxito da produção agrícola, sendo o pH um dos fatores mais relevantes por sua influência direta sobre diversos processos químicos, físicos e biológicos. Diante disso, a adoção de práticas de correção do solo mais assertivas torna-se essencial. Contudo, é fundamental que essas estratégias não se limitem apenas aos aspectos físicos e químicos, mas que também considerem os parâmetros biológicos do solo, visando promover um equilíbrio funcional entre esses três pilares fundamentais para uma produção agrícola sustentável e eficiente.

É fundamental buscar corretivos de solo que apresentem maior reatividade e solubilidade, capazes de promover a neutralização da acidez de forma mais rápida e eficiente, reduzindo a dependência de práticas intensivas de incorporação mecânica. Essa característica é especialmente vantajosa em sistemas de cultivo conservacionistas, como o plantio direto, onde a mobilização do solo é minimizada.

Os carbonatos e hidróxidos apresentam comportamentos distintos no solo, em função de suas características químicas e físico-químicas. A compreensão dessas diferenças, bem como de suas respectivas vantagens e limitações, é fundamental para subsidiar um manejo mais eficiente da acidez e otimizar a disponibilidade de nutrientes no sistema solo-planta. A aplicação eficiente de corretivos para a correção do solo desempenha papel fundamental na promoção de uma agropecuária sustentável, uma vez que a correção do pH do solo contribui para o aumento da disponibilidade de nutrientes e para o equilíbrio da microbiota edáfica.

Esse ambiente mais favorável à atividade biológica pode reduzir gradativamente a necessidade do uso de fertilizantes sintéticos, promovendo maior eficiência na utilização de bioinsumos e contribuindo para a preservação dos recursos naturais e a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

4. OBJETIVOS

4.1 objetivos gerais

Avaliar a eficiência de corretivos à base de hidróxidos e carbonatos, aplicados superficialmente em diferentes doses e granulometrias, na correção da acidez do solo e seus impactos sobre os atributos biológicos do solo e no desenvolvimento da cultura da soja.

4.2 objetivos específicos

Avaliar a eficiência da correção do solo em função de diferentes tipos de corretivos, doses e granulometrias, com base nos seguintes parâmetros:

- Alterações nas condições químicas do solo;
- Características morfológicas quantitativas relacionadas ao crescimento e à produtividade da soja;
- Condições microbiológicas do solo.

5. HIPÓTESES

- H0 – A aplicação de corretivos em superfície não é uma boa opção na cultura da soja.
- H1 – O uso de corretivos de solo aplicados em superfície melhora as condições químicas e biológicas do solo, propiciando melhores condições de desenvolvimento para cultura da soja, resultando em maiores produtividades.

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1 Caracterização do experimento

O experimento foi conduzido no Sítio Santa Terezinha, localizado no Bairro Água Seca, no município de Bandeirantes-PR, pertencente à mesorregião Norte Pioneiro do Paraná. A área experimental está situada nas coordenadas geográficas -23°17'41.33" S de latitude e -50°42'54.86" W de longitude, a uma altitude de 470 metros. A região possui clima subtropical úmido (Cfa), conforme a classificação climática de Köppen. O solo da área foi classificado como um Latossolo Vermelho eutrófico, muito argiloso, característica típica da região, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).

O experimento teve início com a delimitação do campo experimental e, posteriormente, a coleta de amostras de solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm, realizadas de forma aleatória na área delimitada, com o objetivo de caracterizar preliminarmente a fertilidade do solo. A amostra foi encaminhada ao laboratório de solos da Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP) para análise e avaliação das propriedades químicas e físicas do solo (Tabela 2).

Tabela 2: Características químicas iniciais do solo

Profundidade	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----			cmolc dm ⁻³	-----		%	
0-20 cm	4,7	22,8	6,9	0,05	4,40	1,60	0	4,65	6,05	10,71	56,5
20-40 cm	4,7	9,4	3,6	0,03	3,60	1,30	0	4,36	4,93	9,29	53,1

pH: potencial hidrogeniônico; **MO:** matéria orgânica; **P:** fósforo; **K:** potássio; **Ca:** cálcio; **Mg:** magnésio; **Al:** alumínio; **H+Al:** hidrogênio mais alumínio; **SB:** soma de bases; **T:** CTC a pH 7; **V:** saturação de bases.

Fonte: do autor, 2024.

6.2 Implantação e condução do experimento

A segunda etapa do experimento se caracterizou pela semeadura da cultivar de soja (Monsoy 6410), realizada no dia 26 de outubro de 2024, com velocidade de trabalho de 5 km h⁻¹. O plantio seguiu as seguintes características: espaçamento entre as linhas de 0,45 m e densidade de 13 sementes por metro, utilizando-se uma dosagem de 190 kg ha⁻¹ do formulado NPK 02-20-18. Os corretivos foram aplicados nas parcelas logo após a semeadura (26 de outubro de 2024). Cada parcela foi composta por 6 linhas de soja espaçadas em 0,45m, com 5 metros de comprimento (13,5m²).

As doses de corretivos para cada tratamento foram estimadas com base nos resultados obtidos na análise de solo (Tabela 2), utilizando o método de elevação da porcentagem de saturação de bases (V%), conforme descrito pelo Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná. O cálculo foi realizado pela seguinte fórmula:

$$NC \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{(V_2 - V_1) \times T}{PRNT}$$

$$NC \text{ (t ha}^{-1}\text{)}_{\text{ajustada}} = NC \times p$$

Em que:

- V1 = Valor da saturação por bases trocáveis do solo, em porcentagem, antes da correção.
- V2 = Valor da saturação por bases trocáveis desejada (60% no caso da soja, de acordo com o manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná).
- T = Capacidade de troca de cátions a pH 7.
- PRNT: Poder relativo de neutralização total do corretivo.
- p = fator de correção referente à profundidade de incorporação do corretivo no solo.

As doses foram calculadas com base nas características do corretivo em pó composto por carbonatos (calcário calcítico), contendo 47% de óxido de cálcio, 4% de óxido de magnésio e um PRNT de 76%, com o objetivo de elevar a saturação de bases para 70%. O cálculo inicial resultou em uma dose de 1.904 kg ha⁻¹, que foi posteriormente ajustada utilizando um fator de correção de 0,5, aplicado em situações de distribuição a lanço, sem incorporação ou com incorporação até 10 cm de profundidade. Após o ajuste, obteve-se a dose final de 952 kg ha⁻¹. Subsequente após determinar a quantidade de corretivo necessária, os valores foram ajustados para o tamanho da área de cada parcela (13,5 m²). A aplicação dos corretivos foi realizada manualmente, sobre a superfície do solo, utilizando o método de aplicação a lanço (Figura 4).

Figura 4: Aplicação dos corretivos sobre as parcelas (26 de outubro de 2024)



Fonte: do autor, 2025.

A mistura biológica, composta por *Bacillus subtilis* (100 mL ha⁻¹) + *Bacillus amyloliquefaciens* (100 mL ha⁻¹) + *Bacillus aryabhatai* (100 mL ha⁻¹) + *Trichoderma sp.* (150 g ha⁻¹) + *Bradyrhizobium japonicum* (200 mL ha⁻¹) + *Azospirillum brasilense* (100 mL ha⁻¹), foi aplicada

sobre o solo em condições úmidas, logo após a ocorrência de uma chuva (Figura 5), por meio de um bico ponta leque amarelo (11002 Magno) entre as linhas de soja, no dia 02 de dezembro de 2024, 37 dias após a aplicação dos corretivos, utilizando uma vazão de 200 L de calda por hectare.

Figura 5: Aplicação da mistura biológica (37 dias após aplicação dos corretivos)



Fonte: do autor, 2024.

O manejo fitossanitário da área foi conduzido conforme as exigências da cultura e o cronograma estabelecido pelo proprietário da área. Realizou-se a dessecação pré-plantio para viabilizar a implantação da cultura, seguida por uma aplicação pós-emergência visando o controle de plantas daninhas. Durante o ciclo da soja, foram realizadas três aplicações de fungicidas em associação com inseticidas, com intervalo médio de 27 dias. Aos 120 dias após a emergência, procedeu-se à dessecação final da área, visando a colheita.

6.3 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O experimento foi conduzido em esquema fatorial $2 \times 3 \times 2 +$ tratamento adicional, considerando dois tipos de corretivos (carbonatos e hidróxidos), três doses diferentes (50%, 100% e 150% da dose recomendada), duas granulometrias distintas (pó e grânulo) e a mistura biológica (tratamento adicional). Além disso, incluiu-se uma testemunha que não recebeu aplicação de corretivos e biológicos. Os tratamentos foram organizados em um delineamento de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Cada parcela possuiu dimensões de 2,7 m de largura (correspondente a seis linhas de soja) por 5 m de comprimento, totalizando uma área de 13,5 m².

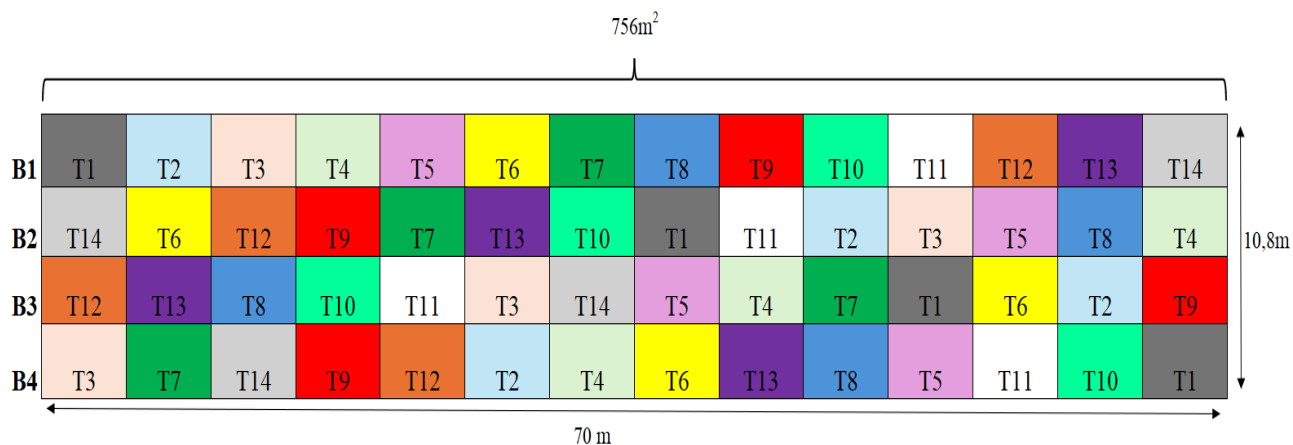
Tabela 3: Organização dos tratamentos

Descrição	
T1	Testemunha
T2	476 kg ha ⁻¹ de hidróxidos (grânulo) + Mistura biológica
T3	952 kg ha ⁻¹ de hidróxidos (grânulo) + Mistura biológica
T4	1428 kg ha ⁻¹ de hidróxidos (grânulo) + Mistura biológica
T5	476 kg ha ⁻¹ de hidróxidos (pó) + Mistura biológica
T6	952 kg ha ⁻¹ de hidróxidos (pó) + Mistura biológica
T7	1428 kg ha ⁻¹ de hidróxidos (pó) + Mistura biológica
T8	476 kg ha ⁻¹ de carbonatos (grânulo) + Mistura biológica
T9	952 kg ha ⁻¹ de carbonatos (grânulo) + Mistura biológica
T10	1428 kg ha ⁻¹ de carbonatos (grânulo) + Mistura biológica
T11	476 kg ha ⁻¹ de carbonatos (pó) + Mistura biológica
T12	952 kg ha ⁻¹ de carbonatos (pó) + Mistura biológica
T13	1428 kg ha ⁻¹ de carbonatos (pó) + Mistura biológica
T14	Mistura biológica

Bacillus subtilis (100 mL ha⁻¹) + *Bacillus amyloliquefaciens* (100 mL ha⁻¹) + *Bacillus aryabhatai* (100 mL ha⁻¹) + *Trichoderma sp.* (150 g ha⁻¹) + *Bradyrhizobium japonicum* (200 mL ha⁻¹) + *Azospirillum brasilense* (100 mL ha⁻¹).

Fonte: do autor, 2024.

Figura 6: Croqui da área experimental

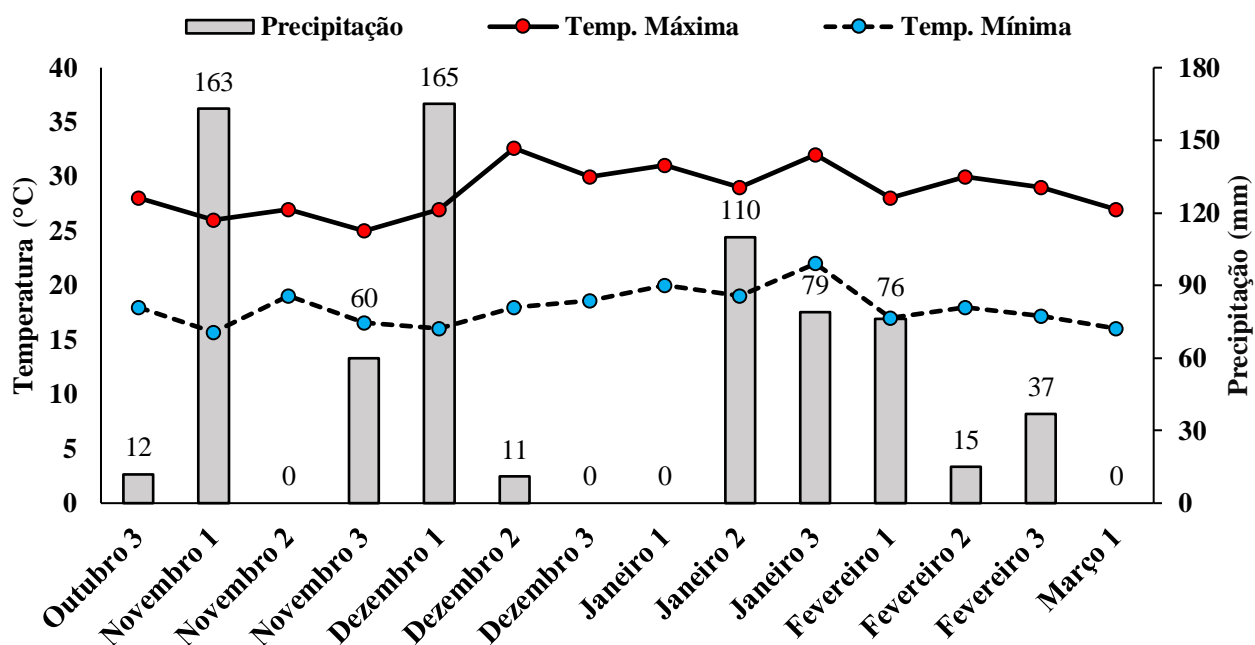


Fonte: do autor, 2024.

6.4 Descrição climática ao longo do experimento

Durante o ciclo da cultura, entre 26 de outubro de 2024 (data da semeadura) e 7 de março de 2025 (data da colheita), foram registrados 728 mm de precipitação (Figura 7), monitorados por um pluviômetro instalado na área experimental. As temperaturas máxima e mínima registradas durante o período foram de 38 °C e 15,7 °C, respectivamente, obtidas por meio do projeto Nasa Power (NASA Langley Research Center, 2025).

Figura 7: Pluviosidade acumulada por decêndio e temperaturas médias máximas e mínimas entre a semeadura (26/10/2024) e a colheita (07/03/2025)



Fonte: do autor, 2025.

7 Avaliações e análises 45 dias após a aplicação (Cultura em estádio R1)

7.1 Avaliação da colonização micorrízica nas raízes

Para avaliação da porcentagem de raízes colonizadas por fungos micorrízicos, foi utilizada a metodologia descrita por Phillips e Hayman (1970). Iniciada com a coleta de plantas no dia 16 de dezembro de 2024 (51 dias após a aplicação dos corretivos).

Figura 8: Coleta de plantas para avaliação



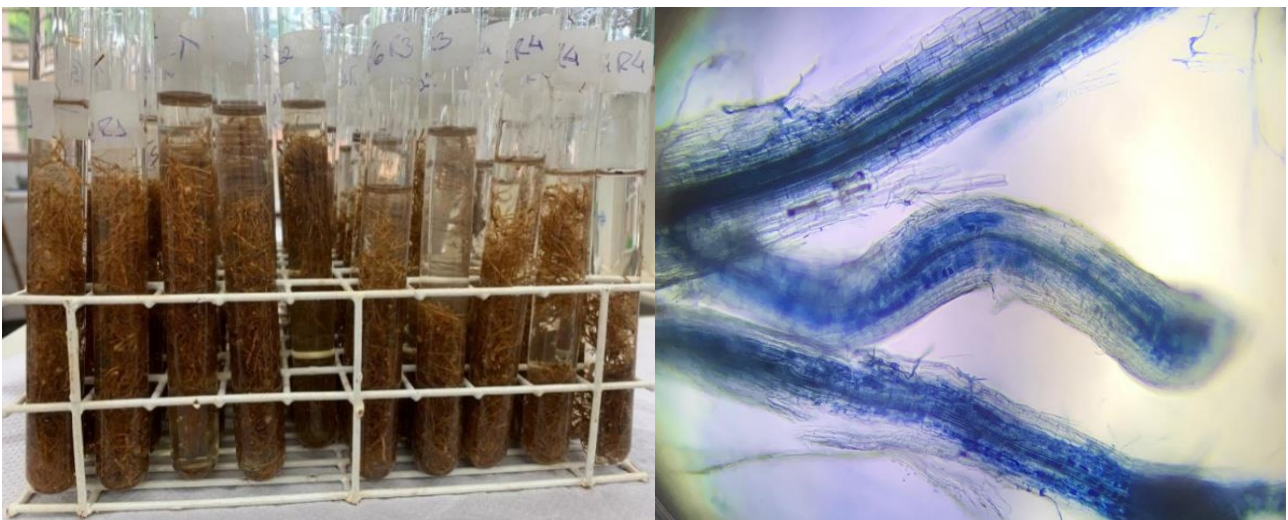
Fonte: do autor, 2024.

Inicialmente, três plantas no estágio de desenvolvimento R1 (uma flor aberta em qualquer nó da haste principal) foram coletadas de forma aleatória em cada parcela experimental. Utilizando uma pá reta, foi retirado um monolito de solo de aproximadamente 20 x 20 cm (Figura 8).

O sistema radicular das três plantas coletadas foi encaminhado ao Laboratório de Microbiologia (LabMicroS) da Universidade Estadual do Norte do Paraná onde as raízes foram lavadas em água corrente e, em seguida, as raízes mais finas foram cortadas e colocadas em tubos de ensaio, submersas em solução de hidróxido de potássio 10% (KOH) (Figura 9). Os tubos foram então expostos a vapor fluente na autoclave por 50 minutos.

Após a exposição a vapor fluente, as raízes foram novamente lavadas em água corrente até a remoção completa da solução de hidróxido de potássio 10% (KOH) e, em seguida, submersas em ácido clorídrico 1N (HCl), sendo agitadas até o clareamento. As raízes foram então lavadas para a eliminação do HCl e, em seguida, submersas em uma solução de azul de tripan 0,05%. O material foi novamente colocado na autoclave em vapor fluente por 10 minutos.

Figura 9: Retiradas das raízes mais finas e contagem de células colonizadas



Fonte: do autor, 2024.

A porcentagem de colonização micorrízica nas raízes foi determinada a partir de raízes processadas e analisadas sob um microscópio binocular. As estruturas micorrízicas presentes nas células radiculares foram contabilizadas, e os resultados foram expressos como porcentagem de colonização micorrízica das raízes (Figura 9).

7.2 Coleta de solo para determinação de parâmetros microbiológicos e pH (51 dias após aplicação dos corretivos)

Para a determinação dos parâmetros microbiológicos e do pH do solo, aos 51 dias após a aplicação dos corretivos, quando a cultura da soja estava no estágio de desenvolvimento R1, foram coletados, na área central de cada parcela experimental, cinco pontos amostrais na camada de 0–10 cm de profundidade, totalizando uma amostra composta de aproximadamente 500 gramas. Uma vez que não foi realizada, inicialmente, a caracterização das condições microbiológicas e do pH do solo na camada de 0–10 cm, os resultados da testemunha foram adotados como parâmetro de comparação com os demais tratamentos.

Após a coleta, as amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório da Universidade (LabMicroS) e peneiradas em malha de 2 mm. Em seguida, foram determinadas as variáveis microbiológicas. O pH do solo foi medido em solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , utilizando um potenciômetro com eletrodo combinado de acordo com Raij *et al.* (2011).

7.2.1 Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (C_BMS).

O carbono da biomassa microbiana do solo (C_BMS) foi determinado pelo método de fumigação-extração indireta (FEI), proposto por Silva *et al.* (2007). As amostras de solo coletadas na profundidade de 0-10 cm foram peneiradas em uma malha de 2 mm e, em seguida, pesadas (20 g) em duplicata, sendo uma amostra destinada à fumigação e a outra, ao controle sem fumigação.

Figura 10: Pesagem e separação das amostras



Fonte: do autor, 2024.

A fim de possibilitar o rompimento da membrana biológica dos microrganismos e a liberação do conteúdo celular ao meio, as amostras foram fumigadas em dessecador contendo béquers com 50 mL de clorofórmio livre de etanol (CHCl_3). O dessecador foi internamente recoberto com papel toalha umedecido e tampado, sendo posteriormente submetido a vácuo por 4 minutos e incubado por 24 horas em ambiente escuro (Vance *et. al.*, 1987).

Após esse período de incubação, o dessecador foi aberto para possibilitar aeração e, em seguida, novamente submetido a vácuo por 4 minutos, sendo esse procedimento repetido de 5 a 6 vezes para a eliminação do clorofórmio. A extração do CBMS foi efetuada com 50 mL de solução de sulfato de potássio (K_2SO_4) 0,5 M sob agitação a 175 rpm por período de 50 minutos e filtrado em papel quantitativo para obtenção do extrato. A determinação do teor de CBMS foi realizado por titulometria (Walkley; Black, 1934, modificado por Tedesco *et. al.*, 1995) foram transferidos 8 mL da solução sobrenadante para erlenmeyers de 250 mL, adicionando 2 mL de solução de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0,066 M e 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) P.A.

Foram acrescentados 70 mL de água deionizada, 5 mL de ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4) P.A. e 4 gotas de difenilamina ($(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$) 1% (m/v) em H_2SO_4 P.A., seguido de titulação com sulfato ferroso amoniacal $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,033 M.

Por este método, o carbono orgânico é oxidado a dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) utilizando íons de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) a uma concentração de 0,066 M em meio fortemente ácido. A reação considera que a quantidade de dicromato reagido corresponde ao carbono presente na amostra. O excesso de dicromato não consumido é então quantificado por titulação com uma solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal.

A determinação do carbono dos extratos fumigados e não fumigados foi calculado de acordo com a equação abaixo:

Equação:

$$C_{(mgC\ Kg^{-1} solo)} = \frac{V_b - V_a \cdot M \cdot 0,003 \cdot V_1 \cdot 10^6}{P_s \cdot V_2}$$

onde:

C = carbono extraído do solo;

V_b (mL) = volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da solução controle (branco);

V_a (mL) = volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra;

M = molaridade exata do $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;

V_1 (mL) = volume do extrator (K_2SO_4) utilizado;

0.003 = miliequivalente do carbono

P_s (g) = massa de solo seco.

Por meio da subtração entre os teores de carbono do solo fumigado e não fumigado, pode-se obter o carbono da biomassa microbiana, sendo calculado conforme a equação 2:

Equação 2:

$$BMS_{(mg\ Kg^{-1})} = \frac{FC}{k_c}$$

onde:

BMS = biomassa de carbono microbiano do solo em mg de C por kg de solo (ou $\mu g.g^{-1}$);

FC = fluxo obtido da diferença entre a quantidade de C ($mgkg^{-1}$) recuperada no extrato da amostra fumigada e a recuperada na amostra não fumigada;

k_c = fator de correção.

O fator de correção (k_c) em situações que exijam maior exatidão deverá ser calculado para cada tipo de solo. Como para os solos do Brasil o fator ainda não foi determinado, pode-se utilizar o valor 0,33 preconizado por Sparling; West (1988), a fim de expressar a fração do C da BMS recuperada após o processo de fumigação-extração.

7.2.2 Determinação da Respiração Basal do Solo (RBS)

A respiração basal do solo (RBS) foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Silva, Azevedo e De-Polli (2007). Foram colocados 50 g de solo em frascos de vidro com tampas de pressão. No interior de cada frasco, adicionaram-se 10 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH) $1\ mol\ L^{-1}$, disposta em um recipiente separado, com a função de absorver o CO_2 liberado durante a respiração microbiana (Figura 11). Os frascos foram hermeticamente fechados e incubados por sete dias, em ambiente escuro, à temperatura de $25 \pm 2\ ^\circ C$. Após esse período, à solução de NaOH foram adicionados 2 mL de cloreto de bário ($BaCl_2$) a 10%, e duas gotas de fenolftaleína a 1% como indicador. A titulação foi realizada com ácido clorídrico (HCl) $0,5\ mol\ L^{-1}$ até a mudança de coloração de rosa para incolor, indicando o ponto final da reação.

Figura 11: Incubação do solo com hidróxido de sódio (NaOH)



Fonte: do autor, 2024.

O cálculo da respiração basal do solo é dado pela equação abaixo:

$$RBS_{(mg\ de\ C-CO_2\ Kg^{-1}\ solo\ h^{-1})} = \frac{(V_b - V_a) \cdot M \cdot 6 \cdot 1000}{P_s \cdot T}$$

Onde:

RBS – Carbono oriundo da respiração basal do solo

V_b (mL) – Volume de ácido clorídrico gasto na titulação da solução controle (branco)

V_a (mL) – Volume gasto na titulação da amostra

M – Molaridade exata do HCl

P_s (g) – Massa de solo seco

T – Tempo de incubação da amostra em horas

7.2.3 Determinação do Carbono Orgânico Total (COT)

O valor do COT foi calculado com base no volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação dos padrões em brancos e das amostras. A partir da equação pode-se determinar a quantidade de carbono orgânico total da amostra em dag kg-1 (Mendonça & Matos, 2005).

Equação:

$$COT = \frac{A \cdot MSF \cdot 3 \cdot 100}{Pa}$$

Onde:

A - Volume calculado (mL)

MSF - Molaridade do Sulfato Ferroso (mol L⁻¹)

Pa - Peso da amostra (mg).

7.2.4 Determinação do Quociente Metabólico do solo (qCO_2)

O qCO_2 é a razão entre a respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo (Silva; Azevedo e De-Polli, 2007), podendo ser utilizado como sensível indicador de estresse quando a C_BMS é afetada. O cálculo qCO_2 da respiração basal do solo é dado pela equação abaixo:

$$qCO_2 = \frac{RBS}{C_{BMS}}$$

Onde:

qCO_2 – Quociente metabólico do solo

RBS – Respiração basal do solo

C_BMS – Carbono da biomassa microbiana do solo

O quociente metabólico (qCO_2) corresponde à relação entre a respiração basal e a biomassa microbiana do solo em um determinado período (Anderson; Domsch, 1993). Esse parâmetro indica a quantidade de CO₂ emitida pela biomassa microbiana ao longo do tempo, refletindo sua atividade respiratória (Alves *et al.*, 2011).

7.2.5 Determinação do Quociente Microbiano ($qMIC$)

O quociente microbiano ($qMIC$) é a relação entre o carbono da biomassa microbiana (BMS-C) e o carbono orgânico total (COT) no solo. Esse índice é amplamente utilizado como um indicador da qualidade da matéria orgânica, pois revela a fração de carbono orgânico imobilizada na biomassa microbiana e a eficiência dos microrganismos na assimilação dos compostos orgânicos (Silva *et al.*, 2010). O $qMIC$ representa a proporção do carbono orgânico total presente na biomassa microbiana do solo. Áreas com menor atividade microbiana tendem a apresentar valores reduzidos desse quociente, indicando menor fração de carbono biologicamente ativo (Carneiro *et al.*, 2009). Por outro lado, valores elevados de $qMIC$ indicam uma matéria orgânica mais ativa e potencialmente disponível para a decomposição pela microbiota do solo.

O cálculo do quociente microbiano é dado pela seguinte equação:

$$q_{MIC} = \left(\frac{C_{BMS}}{COT} \right) \cdot 100$$

Onde:

q_{MIC} - quociente microbiano (%)

C_{BMS} - carbono da biomassa microbiana (mg C micr. kg^{-1} solo)

COT - carbono orgânico total do solo (mg C total kg^{-1} solo)

7.2.6 Massa seca da raiz e parte aérea

Para a avaliação da massa seca do sistema radicular e da parte aérea, foram coletadas 3 plantas em estágio R1 aleatoriamente de cada parcela experimental, utilizando uma pá reta para remover um monolito de solo de aproximadamente 20 x 20 cm. As raízes foram lavadas, colocadas em sacos de papel e posteriormente mantidas em estufa a 60 °C para secagem, permanecendo até atingirem peso constante, indicando a completa perda da umidade das amostras. Para avaliação da massa seca da parte aérea foram aproveitadas as 3 plantas já coletadas que foram também colocadas em sacos de papel a posteriormente levadas a estufa para secagem.

Figura 12: Secagem e pesagem da parte aérea e sistema radicular.



Fonte: do autor, 2024.

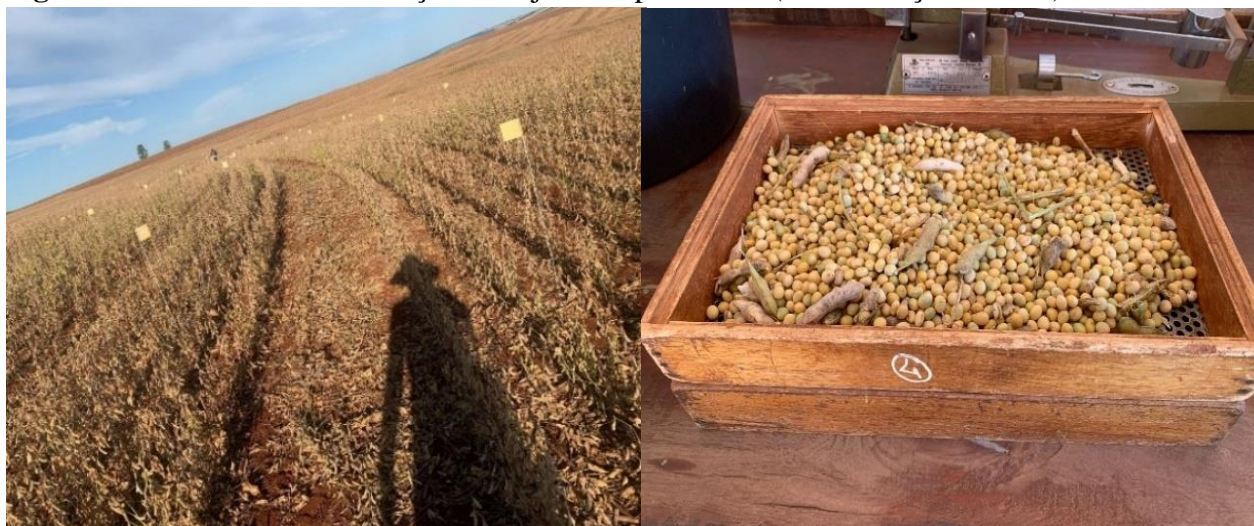
7.3 AVALIAÇÕES DE FINAL DE CICLO

7.3.1 Massa de mil grãos (MMG) e produtividade

O ensaio foi encerrado com a colheita do campo experimental no dia 7 de março de 2025, aos 126 dias após a emergência da cultura. Nessa etapa, foram coletadas amostras para a avaliação da produtividade, da massa de mil grãos e do monitoramento das características químicas do solo.

Para avaliação da produtividade e da massa de mil grãos, foram colhidas as duas fileiras centrais de cada parcela experimental, excluindo-se 1 metro de cada extremidade das parcelas, que apresentam um comprimento total de 5 metros. Dessa forma, foram avaliados 6 metros lineares, correspondentes às duas fileiras centrais (Figura 13), dentre as seis fileiras de soja dispostas em cada parcela.

Figura 13: Colheita e classificação da soja do experimento (07 de março de 2025)



Fonte: do autor, 2025.

Para a determinação da produtividade, as amostras foram trilhadas mecanicamente e, posteriormente, coletaram-se pequenas subamostras da soja colhida. Essas subamostras foram misturadas, formando uma amostra composta de 500 gramas, a qual foi utilizada para realizar a classificação com uma peneira de 4 mm, removendo-se todas as impurezas e grãos avariados (Figura 13). Em seguida, realizou-se a medição da umidade dos grãos, que apresentaram teor de 12,9%.

Com isso, determinaram-se os descontos necessários e obteve-se a produtividade líquida de cada parcela experimental. Para a determinação da massa de mil grãos, utilizou-se um contador eletrônico de grãos.

7.3.2 Análise Química do solo (pH, Ca²⁺, Mg²⁺ e P)

Após a colheita da área experimental, foram coletadas amostras de solo com o auxílio de um trado holandês, em dois pontos situados entre as duas linhas centrais de semeadura de cada parcela experimental, nas camadas de 0–20 cm e 20–40 cm de profundidade. As duas amostras foram homogeneizadas, resultando em uma amostra composta de aproximadamente 500g, que foi encaminhada ao laboratório da universidade para análise e avaliação das características químicas (pH, Ca²⁺, Mg²⁺ e P).

Figura 14: Coleta das amostras de solo



Fonte: do autor, 2025.

Após a secagem ao ar, as amostras de solo foram peneiradas em malha de 2 mm. Em seguida, foram determinadas as seguintes variáveis: pH e os níveis de Ca²⁺, Mg²⁺ e P.

A determinação do pH do solo foi realizada conforme a metodologia descrita por Raij *et al.* (2001). Inicialmente, foram transferidos 10 cm³ de solo seco e peneirado para frascos plásticos. Em seguida, foram adicionados 25 mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, mantendo a mistura em repouso por 15 minutos. Posteriormente, a suspensão foi agitada por 10 minutos a 220 rpm em agitador de movimento circular horizontal e deixada em decantação por 30 minutos. Antes da medição, o potenciômetro foi calibrado com soluções-tampão de pH 4,0 e 7,0. A leitura do pH foi realizada introduzindo-se o eletrodo combinado de modo que a ponta de vidro tocasse levemente a camada de sedimento, mantendo a saída do eletrodo de referência submersa. O valor de pH foi registrado após a estabilização da leitura.

A determinação dos teores de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) trocáveis foi realizada utilizando o método de titulação com solução de EDTA, de acordo com a metodologia proposta por

Raij *et al.* (2001). Foram retiradas, com auxílio de pipetador, duas alíquotas de 10 mL do extrato de KCl 1 mol L⁻¹, as quais foram transferidas para frascos.

Na primeira alíquota, adicionaram-se 2 mL da solução-coquetel de hidróxido de sódio e cinco gotas do indicador calcon, procedendo-se à titulação imediata do cálcio com solução de EDTA 0,005 mol L⁻¹, até a mudança de coloração de vermelho-rosado para azul. Também foi realizada uma prova em branco, cujo valor foi descontado dos resultados obtidos nas amostras de solo.

Na segunda alíquota, adicionaram-se 2 mL da solução tampão pH 10 e, após alguns minutos, cinco gotas do indicador negro de eriocromo T. Procedeu-se à titulação conjunta de cálcio e magnésio (Ca²⁺ + Mg²⁺) com solução de EDTA 0,005 mol L⁻¹, até a viragem de vermelho-vinho para azul. Assim como na etapa anterior, realizou-se uma prova em branco, sendo o valor obtido descontado dos resultados das amostras de solo.

A determinação do fósforo foi realizada conforme a metodologia descrita por Teixeira, Saldanha e Campos (2017), utilizando método colorimétrico com leitura da absorbância em espectrofotômetro de absorção molecular, no comprimento de onda de 660 nm.

7.3.3 Determinação da Saturação por bases

Denomina-se saturação por bases (V%) a soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions:

$$V\% = \left(\frac{SB}{CTC} \right) \times 100$$

Onde:

SB = soma de bases (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺)

CTC = capacidade de troca de cátions (SB + H + Al)

A saturação por bases é um excelente indicador das condições gerais da fertilidade do solo, sendo inclusive utilizada como critério complementar na classificação de tipos de solos. Baseando-se na saturação por bases, os solos podem ser classificados como eutróficos (férteis), quando V% ≥ 50%, e distróficos (pouco férteis), quando V% < 50%. Determinados solos distróficos podem apresentar deficiência acentuada de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, além de níveis elevados de alumínio trocável, com saturação em alumínio (m%) superior a 50%. Nesses casos, são denominados solos álicos (extremamente pobres), com alumínio trocável ≥ 3 mmolc e m% ≥ 50%. Ressalta-se que a maioria das culturas agrícolas alcança boa produtividade quando o solo apresenta V% entre 50 e 80% e pH na faixa de 6,0 a 6,5, conforme descrito por Embrapa (2010).

7.3.4 Estimativa dos preços dos corretivos e da saca de soja

O preço de venda da soja foi estimado a partir de valores compilados do banco de dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), da Universidade de São Paulo, considerando o indicador CEPEA/ESALQ/B3 para o estado do Paraná. O valor-base utilizado para estimativa das receitas foi obtido pela média aritmética das variações mensais entre dezembro de 2024 e dezembro de 2025, resultando no valor médio de R\$ 131,48 por saca de 60 kg.

Os valores dos corretivos utilizados na análise econômica foram estimados com base em valores médios praticados no mercado de insumos agrícolas no estado do Paraná em 2025, considerando relatórios de custo de produção da Companhia Nacional de Abastecimento e boletins do Departamento de Economia Rural do Paraná. Para os cálculos foi considerado o valor médio de R\$ 200,00 t⁻¹ para os carbonatos e R\$ 1.100,00 t⁻¹ para os hidróxidos, sendo os custos convertidos para hectare conforme as doses aplicadas em cada tratamento.

A partir desses valores, foram calculados os indicadores econômicos do experimento, compreendendo a receita bruta (produtividade × valor da saca de soja), o custo de cada tratamento, estimado com base na dose aplicada por hectare, e a receita líquida, obtida pela diferença entre a receita bruta e o custo correspondente a cada tratamento.

8. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

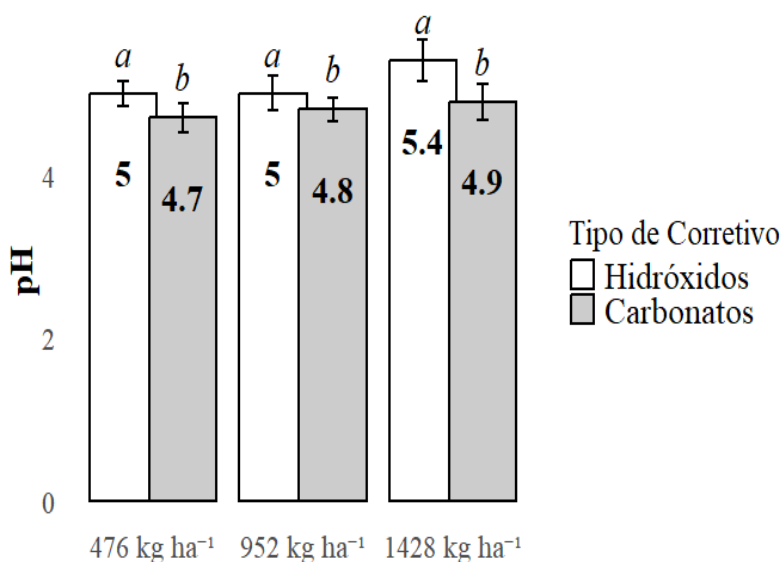
As análises estatísticas foram realizadas no software R-Studio, utilizando o pacote ExpDes.pt. Para avaliar a normalidade dos dados, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=5\%$), enquanto a homogeneidade das variâncias foi analisada por meio do teste de Levene ($\alpha=5\%$). Após a realização da ANOVA ($\alpha=5\%$), foi realizado o desdobramento dos fatores, seguido da comparação das médias utilizando o teste de Scott-Knott ($\alpha=5\%$). Adicionalmente, foram ajustados modelos de regressão e, por fim, as relações entre variáveis foram analisadas por meio do teste de correlação de Pearson.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

9.1 Efeito dos corretivos sobre pH do solo

Os valores médios de pH do solo (Figura 15) indicam a maior influência dos corretivos a base de hidróxidos, na elevação do pH 51 dias após a aplicação, sob uma pluviosidade acumulada de 385 mm, na camada de 0-10 cm de profundidade. A testemunha que não recebeu a aplicação de corretivos apresentou pH em 4,7 (em solução de CaCl₂), valor abaixo da faixa ideal recomendada, que varia de 5,5 a 6,0, segundo Malavolta (1981).

Figura 15: Variação do pH do solo na camada de 0-10 cm, aos 51 dias após a aplicação dos corretivos



Fonte: do autor, 2025.

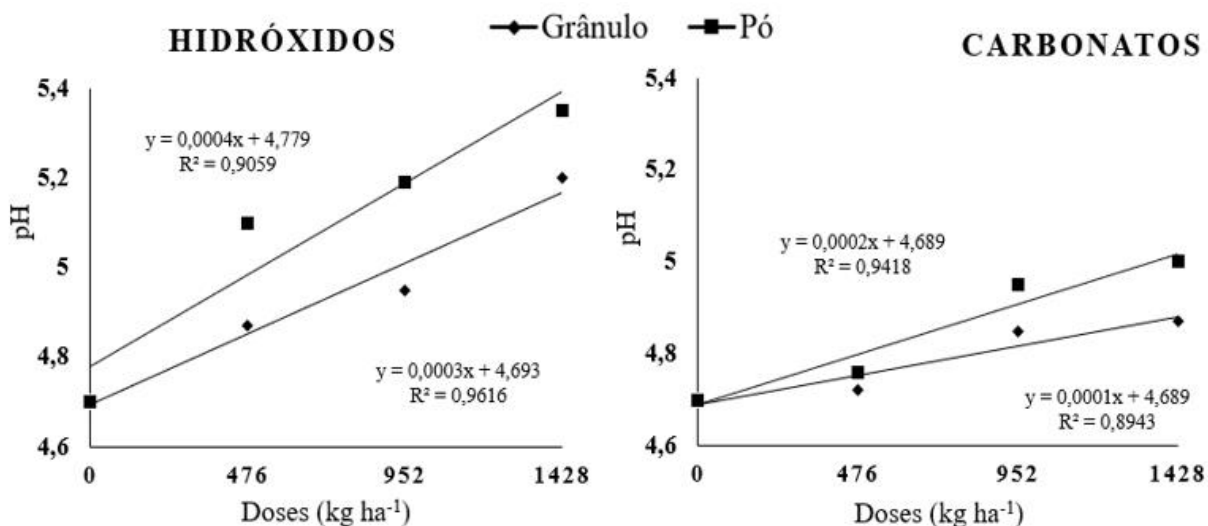
De acordo com as doses avaliadas, verificou-se que os hidróxidos foram mais eficazes na elevação do pH do solo em relação aos carbonatos, independentemente da dose aplicada (50%, 100% ou 150% da dose recomendada). Essa diferença de desempenho foi particularmente evidente na maior dose testada (150% da recomendação), na qual os hidróxidos elevaram o pH para 5,4, enquanto os carbonatos alcançaram um valor de pH de 4,9. Esses resultados indicam que os hidróxidos demonstraram maior eficiência e rapidez na neutralização da acidez do solo, promovendo uma elevação mais expressiva nos níveis de pH.

De acordo com Havlin *et al.*, (2013) a maior eficiência dos hidróxidos pode ser atribuída à sua elevada solubilidade e reatividade química, características que aceleram o processo de neutralização dos íons H⁺ no solo, resultando em um aumento mais expressivo nos níveis de pH. Por

outro lado, os carbonatos, devido à sua dissolução mais lenta, apresentaram uma resposta gradual e menos eficaz no mesmo intervalo de tempo.

A granulometria do corretivo influenciou significativamente a velocidade de reação e a resposta às doses, sendo que os produtos em pó apresentaram maior eficiência na elevação do pH 51 dias após aplicação dos corretivos (Figura 16). Essa superioridade pode ser explicada pela maior área superficial dos corretivos finamente moídos, o que aumenta o contato com as partículas do solo e favorece a dissolução e reatividade (Alcarde, 2005). Assim, em situações que exigem urgência na elevação do pH, a utilização de corretivos a base de hidróxidos com partículas mais finas pode ser mais eficiente na neutralização da acidez em menor intervalo de tempo, quando comparada a produtos granulados ou com maior diâmetro de partículas.

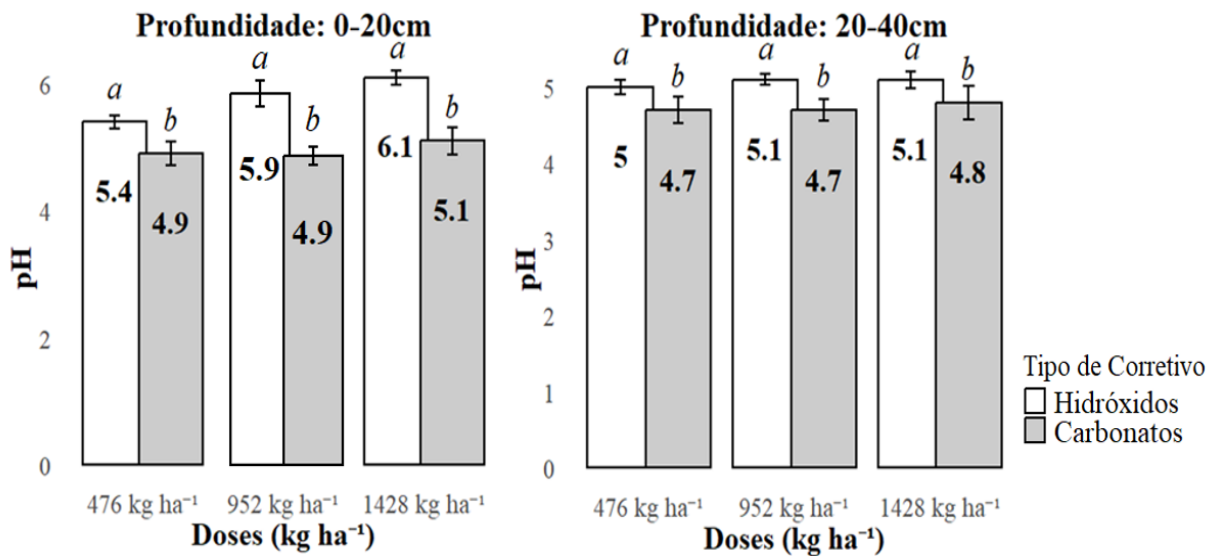
Figura 16: Efeito da dose e granulometria sobre o pH do solo 51 dias após aplicação do corretivo (camada de 0-10 cm)



Fonte: do autor, 2025.

Na avaliação final das características químicas do solo (132 DAA) com uma pluviosidade de 728mm, observou-se, por meio da análise de desdobramento da interação entre os fatores tipo de corretivo e dose, que os tratamentos com hidróxidos apresentaram maior eficiência na elevação do pH do solo, em ambas as profundidades analisadas (0–20 cm e 20–40 cm), quando comparados aos carbonatos (Figura 17).

Figura 17: Variação do pH do solo 132 dias após a aplicação dos corretivos



Fonte: do autor, 2025.

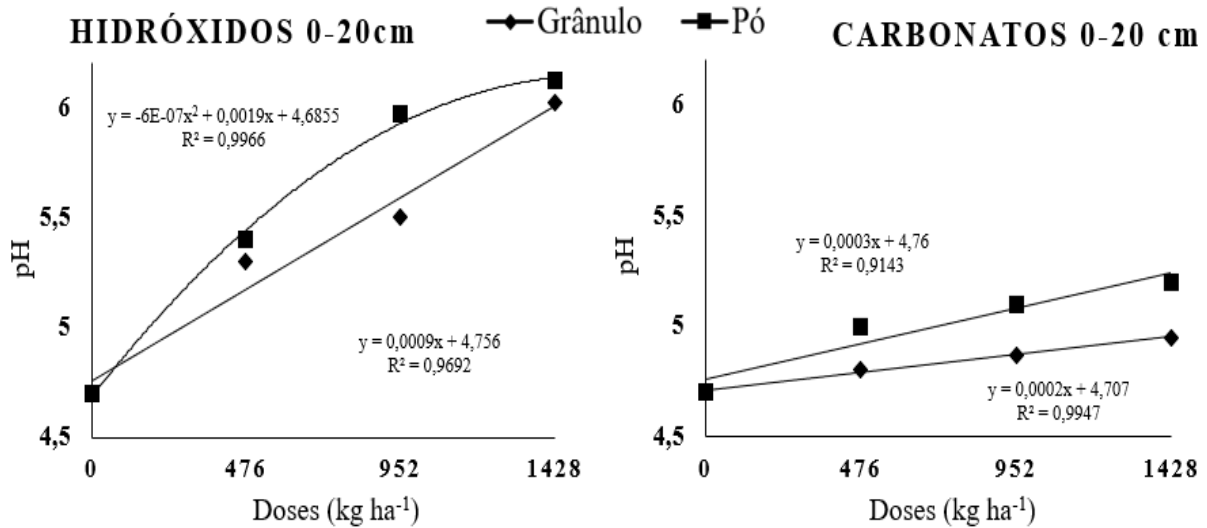
Na camada de 0–20 cm, os hidróxidos elevaram o pH para 5,4, 5,9 e 6,1 nas doses de 476; 952 e 1428 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto os carbonatos permaneceram entre 4,9 e 5,1 nas mesmas doses. Esses resultados evidenciam uma resposta crescente dos hidróxidos à elevação das doses, com diferenças entre os corretivos dentro de cada dose aplicada. De forma semelhante, na profundidade de 20 - 40 cm, os hidróxidos elevaram o pH para 5,0; 5,1 e 5,1, superando novamente os valores observados com os carbonatos (4,7 e 4,8). Esses resultados reforçam o desempenho superior dos hidróxidos na correção da acidez do solo, inclusive em camadas subsuperficiais, evidenciando maior mobilidade e efeito residual em comparação aos carbonatos.

No entanto, a redução no efeito corretivo com o aumento da profundidade sugere que, apesar da maior solubilidade e potencial de lixiviação dos hidróxidos, sua movimentação vertical pode ser limitada por fatores como a textura e compactação do solo. Segundo Horn (1988), quanto maior o teor de argila, mais suscetível o solo se torna à compactação, resultando em uma maior espessura da camada compactada. Assim, a eficiência na utilização de corretivos não depende apenas de sua natureza química, mas também de atributos físicos do solo, que podem facilitar ou dificultar a infiltração da água e a penetração das raízes no perfil do solo (Richart *et al.*, 2005).

A Figura 18, demonstra a variação do pH em função das diferentes doses do corretivo e das granulometrias analisadas. Os resultados indicam que os corretivos à base de hidróxidos, especialmente na forma de pó, proporcionam uma resposta mais eficiente na elevação do pH do solo na camada de 0-20 cm. Essa tendência confirma a maior solubilidade e reatividade dos hidróxidos, garantindo uma rápida neutralização dos íons H⁺ presentes no solo mesmo quando aplicados em

superfície. Como consequência, a variável resposta (pH) torna-se muito mais sensível ao fator dose nos tratamentos que receberam hidróxidos comparados aos tratamentos que receberam carbonatos.

Figura 18: Efeito da dose e granulometria sobre o pH do solo 132 dias após a aplicação dos corretivos (camada de 0-20 cm)



Fonte: do autor, 2025.

9.2 Avaliação dos atributos microbiológicos do solo (soja em estágio R1)

Na Tabela 4, referente aos atributos microbiológicos do solo, observa-se que não houve diferença nos níveis de carbono orgânico total (COT), indicando que a aplicação dos corretivos nas diferentes doses e granulometrias, não influenciaram diretamente esse parâmetro no curto prazo. Segundo Oliveira Júnior *et al.* (2008), o COT é um indicador relativamente estável da matéria orgânica total, sendo pouco sensível a mudanças químicas a curto prazo podendo demandar mais tempo para apresentar alterações detectáveis.

Tabela 4: Análise dos atributos microbiológicos do solo no estágio de pleno florescimento da cultura da soja

Trat.	COT	C_BMS	RBS	qCO_2	$qMIC$
	(g.kg ⁻¹)	(mg C. Kg ⁻¹ solo)	(mg de C-CO ₂ Kg ⁻¹ .h ⁻¹)	(RBS/C_BMS ⁻¹)	(%)
Testemunha	12,65 a	54,64 c	0,35 d	7,05 a	0,42 b
476 kg ha ⁻¹ H. G.	15,15 a	156,13 a	0,65 c	4,30 b	1,07 a
952 kg ha ⁻¹ H. G.	14,02 a	112,73 b	0,68 c	6,39 b	0,79 b
1428 kg ha ⁻¹ H. G.	13,82 a	121,96 b	0,76 b	6,70 b	0,89 a
476 kg ha ⁻¹ H. P.	14,82 a	133,85 a	0,79 b	6,19 b	0,90 a
952 kg ha ⁻¹ H. P.	15,05 a	117,13 b	0,75 b	6,61 b	0,78 b
1428 kg ha ⁻¹ H. P.	14,99 a	120,52 b	0,76 b	6,55 b	0,82 a
476 kg ha ⁻¹ C. G.	15,21 a	106,92 b	0,78 b	7,38 a	0,70 b
952 kg ha ⁻¹ C. G.	14,60 a	107,80 b	0,91 a	8,65 a	0,74 b
1428 kg ha ⁻¹ C. G.	15,52 a	173,54 a	0,92 a	5,67 b	1,10 a
476 kg ha ⁻¹ C. P.	14,50 a	96,58 b	0,76 b	7,93 a	0,66 b
952 kg ha ⁻¹ C. P.	15,46 a	148,71 a	0,71 c	5,05 b	0,98 a
1428 kg ha ⁻¹ C. P.	14,43 a	125,61 a	0,76 b	6,59 b	0,87 a
Mistura biológica	15,96 a	94,48 b	0,79 b	8,58 a	0,57 b
CV (%)	12,06	23,73	9,11	22,21	25,63

COT: Carbono Orgânico Total; **CBMS:** Carbono da Biomassa Microbiana do Solo; **RBS:** Respiração Basal do Solo; **qCO_2 :** Quociente Metabólico do Solo; **$qMIC$:** Quociente Microbiano. As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. H.G.: hidróxidos em grânulos; H.P.: hidróxidos em pó; C.G.: carbonatos em grânulos; C.P.: carbonatos em pó.

Fonte: do autor, 2025.

Os resultados evidenciaram diferenças entre os tratamentos para o C_BMS, demonstrando a sensibilidade da biomassa microbiana às mudanças químicas que acontecem no solo ocasionadas as diferentes fontes e doses de corretivos aplicados. Observou-se que os hidróxidos, em doses mais baixas (476 kg ha⁻¹), proporcionaram os maiores valores de biomassa, enquanto nos tratamentos com carbonatos foram necessárias doses mais elevadas para atingir níveis equivalentes. Esse comportamento pode ser atribuído às características químicas de cada corretivo: os hidróxidos apresentam maior solubilidade e rápida reação no solo, promovendo correção imediata da acidez e disponibilização de nutrientes em concentrações adequadas para estimular a microbiota. O carbono microbiano é um indicador da biomassa microbiana, refletindo a quantidade de microrganismos presentes no solo. Valores elevados desse indicador estão frequentemente associados a uma intensa atividade microbiológica, favorecendo a eficiente decomposição da matéria orgânica e a rápida liberação de nutrientes (Joergensen; Emmerling 2006).

Por outro lado, doses mais altas, associada rápida liberação de íons provocada pelos hidróxidos, pode provocar picos de disponibilidade iônica e de pH, resultando em desequilíbrios

temporários no ambiente. Segundo Aoyama *et al.* (2006) a elevada concentração de Ca^{2+} pode aumentar a condutividade elétrica do solo e alterar o potencial osmótico do meio, induzindo estresse osmótico em microrganismos mais sensíveis. Esse estresse compromete a homeostase celular e reduz a eficiência na incorporação de carbono na biomassa microbiana, limitando seu crescimento mesmo diante de condições de maior disponibilidade de nutrientes.

A razão entre a respiração basal do solo (RBS) e o carbono da biomassa microbiana do solo (C_BMS) resulta no quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), um indicador útil para detectar estresses no solo causados por distúrbios. Dessa forma, observa-se que todos os tratamentos que receberam aplicação de corretivos apresentaram valores reduzidos em relação a testemunha e ao T14, onde foi aplicado somente a mistura biológica, indicando menor estado de estresse no solo. Contudo, verificou-se exceção nos tratamentos com carbonato granulado nas doses de 476 e 952 kg ha^{-1} , bem como com carbonato em pó na dose de 476 kg ha^{-1} . Esses resultados estão relacionados à solubilidade dos corretivos, visto que o carbonato granulado, em suas menores doses, não foi suficiente para atender às necessidades para correção do solo, assim como o carbonato em pó na menor dose testada também não proporcionou efeito adequado. Valores de $q\text{CO}_2$ mais distantes de zero indicam maior estresse, refletindo menor eficiência metabólica dos microrganismos e servindo como um importante bioindicador da qualidade biológica do solo (Matsumoto; Marques, 2015).

O quociente microbiano ($q\text{MIC}$) é determinado pela relação entre C_BMS e COT, refletindo a eficiência da comunidade microbiana na assimilação do carbono presente no solo. O quociente microbiano ($q\text{MIC}$) apresentou diferença entre os tratamentos. Os menores valores foram observados na testemunha e no T14 (mistura biológica), indicando que a aplicação de corretivos contribuiu positivamente para maior eficiência dos microrganismos do solo em incorporar o carbono orgânico total (COT) à biomassa microbiana, favorecendo a ciclagem e a disponibilização de nutrientes às plantas.

Os resultados com valores mais elevados indicam uma maior proporção do carbono total sendo alocada na biomassa microbiana, o que sugere um solo mais ativo biologicamente e em maior equilíbrio funcional, favorecido por condições químicas mais adequadas à atividade microbiana. Isso evidencia uma maior proporção do carbono total alocado na biomassa microbiana, in-

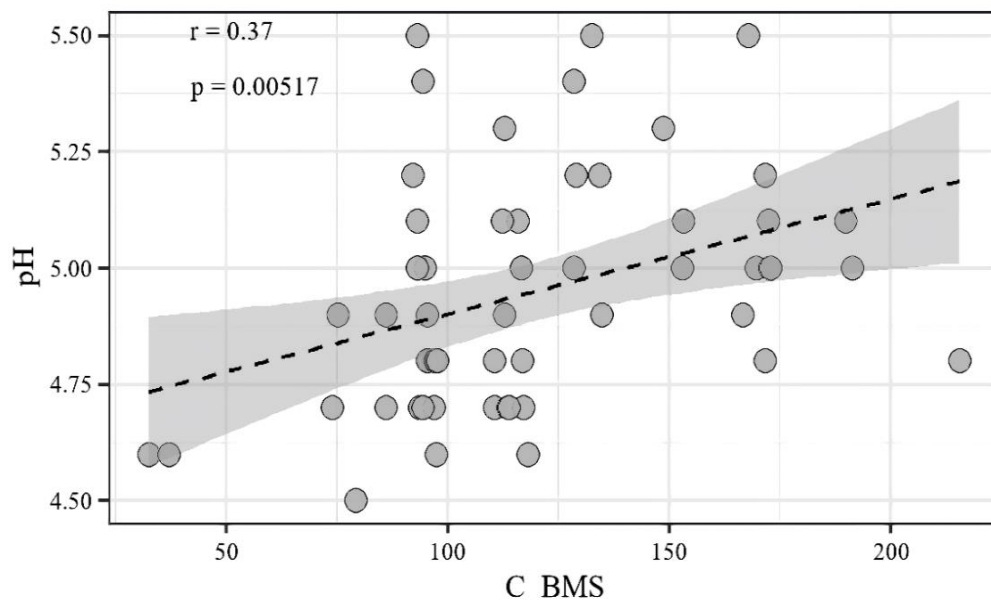
dicando um solo com maior atividade biológica, favorecida pelas condições químicas proporcionadas pela aplicação de corretivos, especialmente os de maior solubilidade e dosagem adequada. Valores entre 1,5 e 1,8 indicam uma maior eficiência nesse processo, sugerindo um solo mais saudável e biologicamente ativo (Baretta *et al.*, 2005).

Dentre os parâmetros biológicos avaliados, verificou-se uma correlação significativa ($r = 0,37$; $p < 0,005$) entre o carbono da biomassa microbiana do solo (C_BMS) e o pH (Figura 19) indicando

que a elevação do pH favoreceu a atividade microbiana, refletida no maior acúmulo de biomassa microbiana. A correlação positiva sugere que condições de menor acidez proporcionam um ambiente mais favorável para o crescimento e metabolismo dos microrganismos presentes no solo. De acordo com Hinsinger *et al.* (2003), o aumento do pH reduz a disponibilidade de íons tóxicos, como Al^{3+} , que em solos altamente ácidos podem inibir significativamente a atividade microbiana e o desenvolvimento dos organismos do solo.

Além disso, o aumento do pH melhora os atributos químicos do solo, promovendo uma maior disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), que são fundamentais para os processos metabólicos microbianos e, conseqüentemente, para o aumento do C_BMS (Haynes & Mokolobate, 2001).

Figura 19: Correlação entre pH e C_BMS 45 dias após aplicação dos corretivos



Fonte: do autor, 2025.

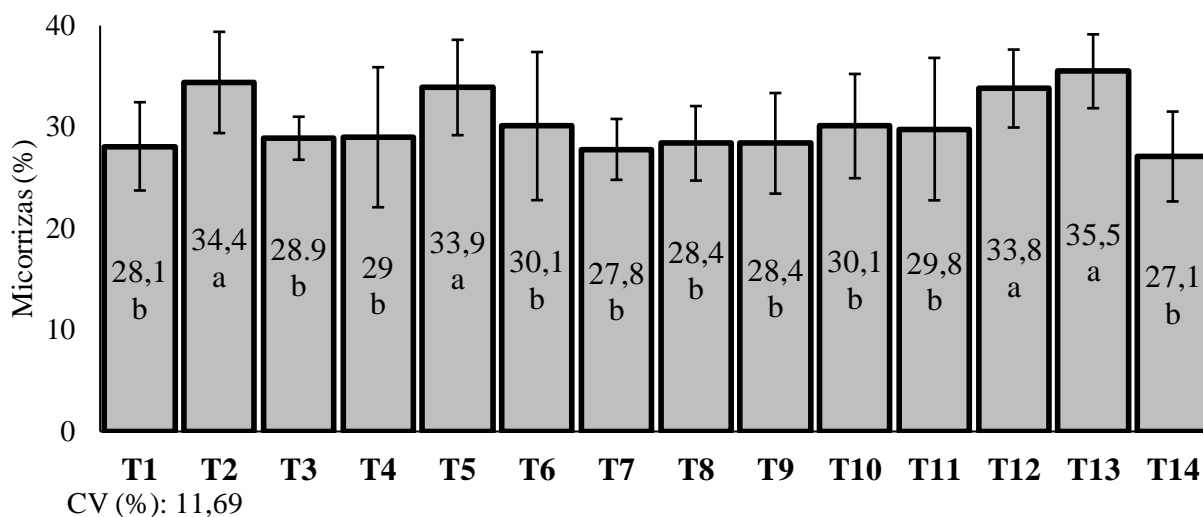
A avaliação da colonização radicular por fungos micorrízicos na cultura da soja (Figura 20), realizada no estágio fenológico R1, revelou que os tratamentos com aplicação de hidróxidos na dose de 476 kg ha^{-1} apresentaram maior taxa de colonização radicular, independentemente da granulometria utilizada. Em contraste, os tratamentos com carbonatos evidenciaram influência da granulometria sobre os resultados obtidos, sendo que os carbonatos na forma granulada não proporcionaram condições favoráveis à colonização. Por outro lado, os carbonatos em pó, nas maiores dosagens avaliadas (952 e 1428 kg ha^{-1}), demonstraram impacto positivo na colonização das raízes.

O melhor resultado atribuído pelas baixas doses de hidróxidos pode ser relacionado à sua elevada solubilidade e reatividade (Havlin *et al.*, 2013). Essas propriedades favorecem a rápida

disponibilidade de íons no solo, promovendo uma correção mais eficiente de suas condições químicas, promovendo condições favoráveis para a germinação de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) que são sensíveis ao pH do solo, ocorrendo de maneira otimizada em faixas de pH que também são ideais para a maioria das plantas cultivadas (Sieverding, 1991).

Por outro lado, a aplicação de doses elevadas de hidróxidos pode resultar em um aumento acentuado do pH e uma disponibilidade excessiva de nutrientes, especialmente de fósforo. Essa condição pode reduzir a necessidade das plantas de estabelecer associações simbióticas com fungos micorrízicos arbusculares, pois a planta obtém grandes quantidades de nutrientes diretamente da solução do solo, diminuindo o benefício e a necessidade da simbiose para ambas as partes (Covacevich; Echeverría; Pagano, 2021).

Figura 20: Porcentagem de raízes colonizadas por fungos micorrízicos



As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. **T1:** Testemunha; **T2:** 476 kg ha⁻¹ de hidróxidos (grânulo) + Mistura biológica; **T3:** 952 kg ha⁻¹ de hidróxidos (grânulo) + Mistura biológica; **T4:** 1428 kg ha⁻¹ de hidróxidos (grânulo) + Mistura biológica; **T5:** 476 kg ha⁻¹ de hidróxidos (pó) + Mistura biológica; **T6:** 952 kg ha⁻¹ de hidróxidos (pó) + Mistura biológica; **T7:** 1428 kg ha⁻¹ de hidróxidos (pó) + Mistura biológica; **T8:** 476 kg ha⁻¹ de carbonatos (grânulo) + Mistura biológica; **T9:** 952 kg ha⁻¹ de carbonatos (grânulo) + Mistura biológica; **T10:** 1428 kg ha⁻¹ de carbonatos (grânulo) + Mistura biológica; **T11:** 476 kg ha⁻¹ de carbonatos (pó) + Mistura biológica; **T12:** 952 kg ha⁻¹ de carbonatos (pó) + Mistura biológica; **T13:** 1428 kg ha⁻¹ de carbonatos (pó) + Mistura biológica; **T14:** Mistura biológica.

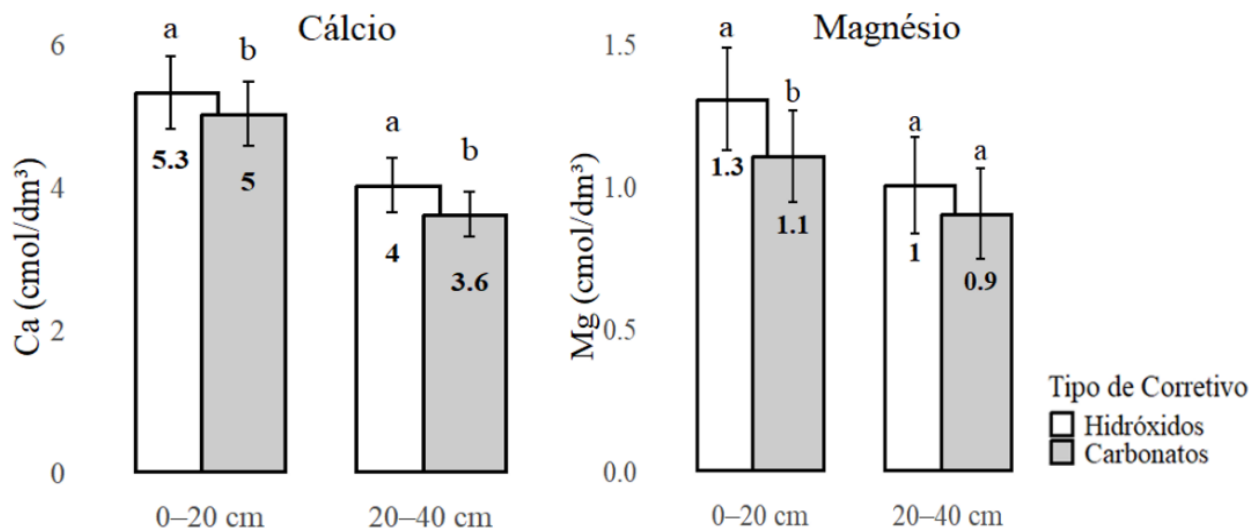
Fonte: do autor, 2025.

9.3 Avaliação dos níveis de cálcio e magnésio no solo (132 dias após aplicação dos corretivos)

A partir do desdobramento da interação entre os fatores, observou-se, na avaliação dos teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) no solo (Figura 21), que os tratamentos com hidróxidos apresentaram desempenho superior na camada de 0–20 cm com diferenças em relação aos carbonatos. Já na camada de 20–40 cm, os resultados foram distintos: os hidróxidos mantiveram-se mais eficientes no fornecimento de cálcio, enquanto para o magnésio não houve diferença significativa entre os tipos de corretivos. Esses resultados indicam que, embora os hidróxidos possuam maior solubilidade e promovam uma liberação mais rápida dos nutrientes, a mobilidade vertical de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil do solo é limitada.

Essa limitação da translocação vertical está relacionada a condições físicas e químicas do solo. As interações desses cátions com a capacidade de troca catiônica (CTC) e às características físicas do solo, como a compactação e o elevado teor de argila, dificultam a lixiviação desses nutrientes. É importante destacar que cálcio e magnésio são cátions bivalentes fortemente adsorvidos aos colóides do solo, o que favorece sua retenção nas camadas superficiais e dificulta sua movimentação para maiores profundidades, mesmo quando aplicados na forma mais solúvel (Ernani *et al.*, 2007).

Figura 21: Mudanças nos níveis de cálcio e magnésio (132 DAA)

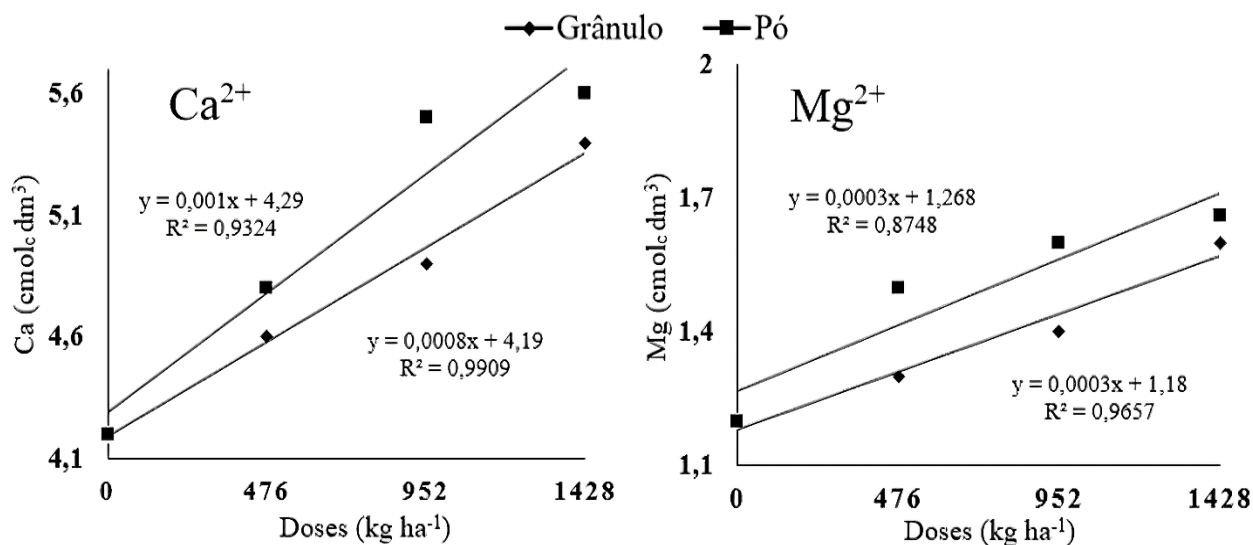


Fonte: do autor, 2025.

A Figura 22 apresenta a variação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} aos 132 dias após a aplicação dos corretivos, em função das doses e da granulometria utilizada. Observa-se que o tamanho das partículas influenciou significativamente os teores desses nutrientes no solo. Os corretivos na forma de pó proporcionaram maior liberação de Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada de 0–20 cm de profundidade,

corroborando Pandolfo e Tedesco (1996) que afirmam que corretivos com partículas mais finas apresentam maior solubilidade, em razão da maior área superficial específica de contato com o solo, o que acelera as reações de neutralização da acidez e liberação de nutrientes. Em contrapartida, corretivos compostos por partículas de maior diâmetro promovem uma liberação mais lenta e gradual dos nutrientes, resultando em efeito residual mais prolongado no solo.

Figura 22: Efeito das doses e da granulometria sobre o nível de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-20 cm de profundidade (132 DAA).



Fonte: do autor, 2025.

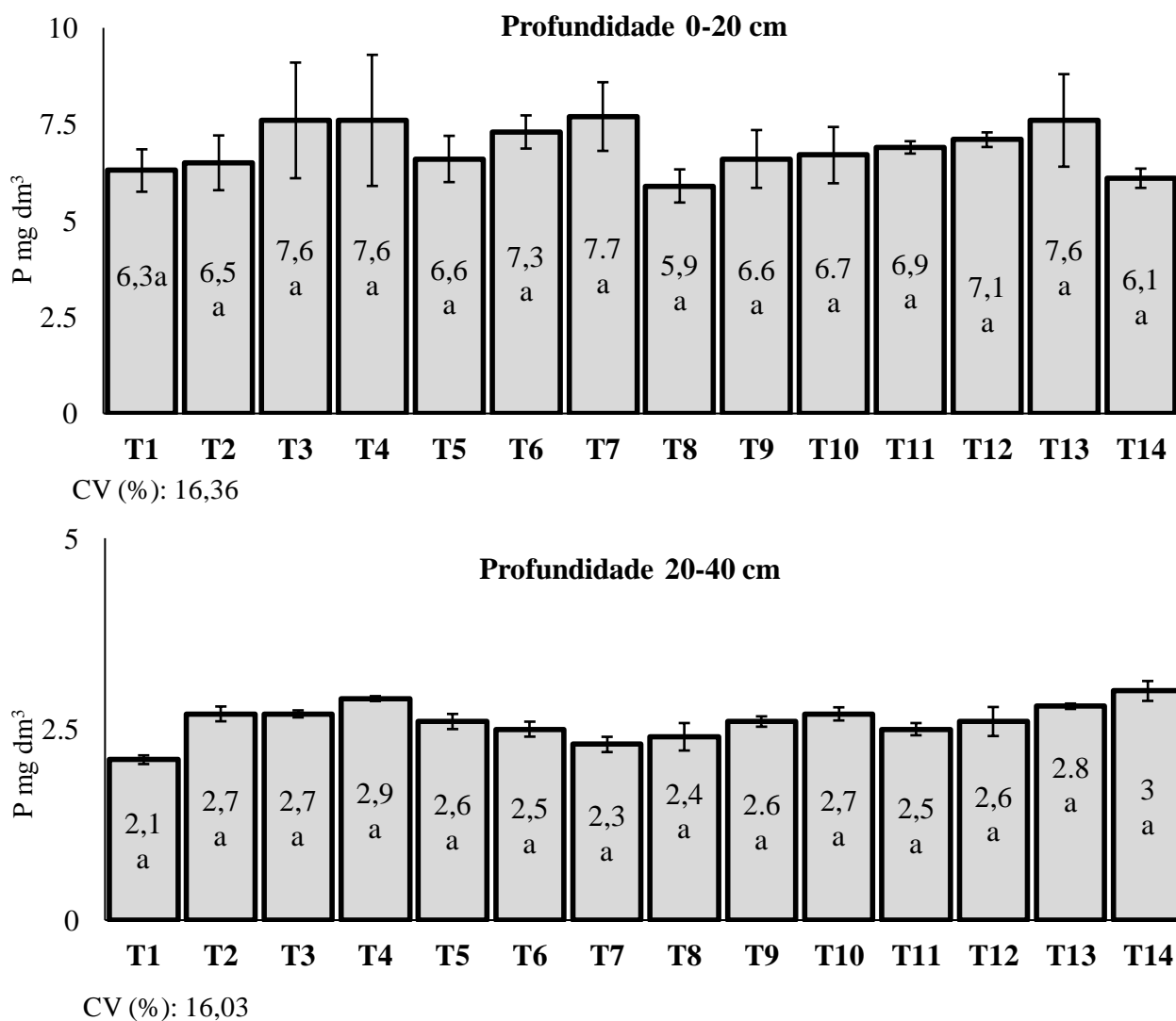
9.4 Disponibilidade de Fósforo no solo

A aplicação de corretivos de solo, como hidróxidos e carbonatos, tem como finalidade principal neutralizar o alumínio, elevar o pH e fornecer Ca^{+2} e Mg^{+2} , mas também exerce influência sobre a adsorção de fósforo. Na avaliação dos níveis de fósforo disponível (Figura 23), determinados pelo método Mehlich-1, observaram-se valores variando de 5,9 a 7,7 mg dm^{-3} na camada de 0–20 cm e de 2,1 a 3,0 mg dm^{-3} na camada de 20–40 cm, 132 dias após a aplicação dos corretivos, não sendo identificadas diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$) em nenhuma das profundidades avaliadas.

A ausência de diferenças entre os tratamentos pode ser atribuída à elevada capacidade de tamponamento do fósforo, evidenciada pelos altos valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) nos solos do Paraná, o que contribui para a estabilidade dos teores disponíveis (Mumbach *et al.*, 2021). Segundo Novais e Smyth (1999), em ambientes tropicais, predominam óxidos de ferro e alumínio com grande capacidade de adsorção, promovendo a retenção do fósforo em formas pouco lábeis e reduzindo sua disponibilidade para as plantas, bem como sua detecção por

extratores como o Mehlich-1. Dessa forma, mesmo após a aplicação de diferentes corretivos e mesmo em cenários de aplicação de fertilizantes fosfatados em doses adequadas o nutriente tende a permanecer adsorvido às partículas do solo, o que dificulta a manifestação de variações significativas nos teores extraídos.

Figura 23: Níveis de fósforo em diferentes camadas de profundidade do solo (132DAA)



As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Níveis de fósforo determinados pelo extrator Mehlich-1.

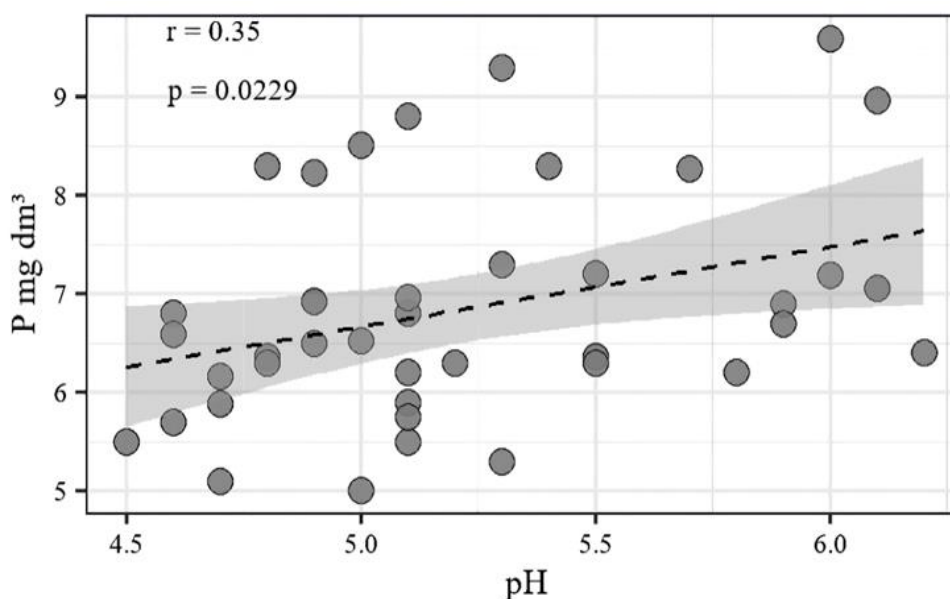
Fonte: do autor, 2025.

Apesar da ausência de diferenças significativas entre os tratamentos quanto aos níveis de P, o teste de correlação de Pearson entre o pH do solo e os níveis de fósforo na camada de 0–20 cm revelou uma relação positiva entre essas variáveis (Figura 24). Esse comportamento é consistente com o conhecimento consolidado sobre a dinâmica do fósforo em solos ácidos, indicando que, mesmo sem

alterar de forma expressiva os valores absolutos de P disponível entre os tratamentos, a diminuição da acidez promove condições químicas mais favoráveis à sua liberação na solução do solo.

O efeito do pH sobre a disponibilidade de fósforo ocorre porque a neutralização da acidez favorece a redução da atividade de Al^{3+} e Fe^{3+} , íons responsáveis pela formação de fosfatos altamente insolúveis, como Al-P (fósforo ligado ao alumínio) e Fe-P (fósforo ligado ao ferro). Assim, à medida que o pH se aproxima da faixa de 5,5 a 6,5, ocorre menor precipitação desses compostos e parte do fósforo anteriormente imobilizado passa a formas relativamente mais lábeis (Novais; Smyth, 1999).

Figura 24: Correlação entre pH e Fósforo



Fonte: do autor, 2025.

9.5 Variáveis químicas do solo (H + Al, T, SB e V%)

Na Tabela 5, observou-se o comportamento de algumas variáveis vinculadas às condições químicas do solo (Hidrogênio mais alumínio; Capacidade de troca catiônica a pH 7; Soma de bases; Saturação por bases) avaliadas nas camadas de 0–20 e 20–40 cm de profundidade. Verificou-se que a aplicação dos corretivos promoveu efeitos somente na camada de 0–20 cm, não sendo observadas diferenças entre os tratamentos na camada de 20–40 cm de profundidade.

Os resultados indicam que os tratamentos com corretivos reduziram os teores de H + Al na camada de 0–20 cm, especialmente nas maiores doses de hidróxidos em pó e granulados. Entretanto, verificou-se que, exceto o carbonato granulado nas doses de mais baixas (476 e 952 kg ha⁻¹), não promoveu redução significativa na concentração desses elementos prejudiciais ao solo e as plantas. Esse resultado está associado à menor solubilidade do corretivo à base de carbonato na forma

granulada, a qual limita a neutralização do alumínio trocável e da acidez promovida por íons H⁺, exigindo maiores doses ou maior tempo de reação para que ocorra sua dissolução e efetiva atuação no solo (Pandolfo; Tedesco, 1996). Como consequência direta dessa maior eficiência na neutralização da acidez, observou-se que os tratamentos com hidróxidos apresentaram os maiores incrementos na soma de bases. Destacaram-se os hidróxidos granulados na dose de 1428 kg ha⁻¹ e os hidróxidos em pó nas doses de 952 e 1428 kg ha⁻¹, comportamento associado à maior solubilidade desses corretivos e, conseqüentemente, à sua maior capacidade de fornecer Ca²⁺ e Mg²⁺, cátions que compõem a soma de bases do solo.

De forma coerente com o aumento da soma de bases, resultados semelhantes foram observados para a saturação por bases (V%), uma vez que a elevação dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ no complexo de troca promoveu maior ocupação dos sítios de troca por cátions básicos, resultando em valores superiores de V% nos mesmos tratamentos.

Tabela 5: Variáveis vinculadas as condições químicas do solo

Trat.	H + Al		T		SB		V%	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Testemunha	4,57 a	4,38 a	10,00 a	8,98 a	5,45 d	4,6 a	51,4 e	51,12 a
476 kg ha ⁻¹ H. G	2,63 b	5,61 a	8,92 a	10,45 a	6,28 c	4,84 a	70,4 c	46,95 a
952 kg ha ⁻¹ H. G.	2,37 c	4,88 a	9,15 a	10,45 a	6,78 b	5,17 a	74,1 c	52,21 a
1428 kg ha ⁻¹ H. G.	2,31 c	3,90 a	9,82 a	10,06 a	7,51 a	5,54 a	76,4 b	58,4 a
476 kg ha ⁻¹ H. P.	2,89 b	3,25 a	9,63 a	8,32 a	6,73 b	5,05 a	69,8 c	55,27 a
952 kg ha ⁻¹ H. P.	1,96 c	3,82 a	9,61 a	9,04 a	7,64 a	5,22 a	79,7 a	58,08 a
1428 kg ha ⁻¹ H. P.	1,56 c	3,62 a	9,65 a	8,53 a	8,09 a	4,91 a	83,7 a	55,27 a
476 kg ha ⁻¹ C. G	3,9 a	3,70 a	9,60 a	8,02 a	5,73 d	4,33 a	59,9 e	54,84 a
952 kg ha ⁻¹ C. G.	3,8 a	3,85 a	10,15 a	8,02 a	6,35 c	4,78 a	62,6 d	55,27 a
1428 kg ha ⁻¹ C. G.	3,2 b	4,01 a	10,13 a	8,64 a	6,87 b	4,85 a	68,1 c	53,59 a
476 kg ha ⁻¹ C. P.	3,15 b	3,94 a	9,32 a	8,76 a	6,17 c	4,82 a	66,4 d	55,33 a
952 kg ha ⁻¹ C. P.	2,90 b	3,57 a	9,83 a	8,20 a	6,93 c	4,63 a	70,5 c	57,57 a
1428 kg ha ⁻¹ C. P.	2,61 b	4,05 a	9,89 a	8,75 a	7,27 b	4,7 a	73,7 c	53,59 a
Mistura Biológica	4,25 a	5,72 a	9,90 a	10,36 a	5,64 d	4,63 a	56,9 e	45,37 a
CV (%):	14,78	22,02	6,27	11,13	5,7	8,6	4,71	9,94

H + Al – Hidrogênio mais alumínio; **T** – Capacidade de troca catiônica a pH 7; **SB** – Soma de bases; **V%** - Saturação por bases.

Fonte: do autor, 2025.

9.6 Características morfológicas quantitativas relacionadas ao crescimento e à produtividade da soja

A aplicação de corretivos influenciou significativamente os parâmetros agrônômicos da cultura da soja (Tabela 6), os produtos de maior solubilidade apresentaram melhor resposta no desenvolvimento da cultura, enquanto o calcário convencional (carbonatos) aplicado em superfície, não foi tão efetivo.

A massa seca das raízes (MSR) apresentou os maiores valores nos tratamentos com aplicação de corretivos à base de hidróxidos, com destaque para a forma em pó, que proporcionou os melhores resultados em todas as doses testadas (476, 952 e 1428 kg ha⁻¹). Já os hidróxidos na forma granulada promoveram incrementos mais expressivos a partir da dose de 952 kg ha⁻¹. Resultados semelhantes foram observados para a massa seca da parte aérea (MSPA), com destaque para os tratamentos com hidróxidos na forma em pó nas doses de 476, 952 e 1428 kg ha⁻¹, bem como o carbonato em pó na dose de 1428 kg ha⁻¹, os quais apresentaram médias superiores a 21 g de MSPA. Esse resultado sugere que produtos na forma de pó e com maior solubilidade, possivelmente permitiram rápido aporte de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, refletindo em um melhor desenvolvimento vegetativo da planta.

Não houve diferença entre os tratamentos para a massa de mil grãos. No entanto, os maiores valores de número de vagens por planta (NVP) foram registrados nos tratamentos com aplicação de hidróxido na forma de pó, independentemente da dose utilizada (476, 952 e 1428 kg ha⁻¹). Resultados expressivos também foram verificados nas doses superiores a 952 kg ha⁻¹ de hidróxido granulado e de carbonato em pó a partir da mesma dosagem. Esses resultados indicam que corretivos com maior solubilidade favoreceram a rápida liberação de Ca²⁺ e Mg²⁺ e promoveram a neutralização da acidez do solo de forma acelerada. Tal correção está diretamente associada à melhoria das condições químicas do solo, promovendo o crescimento do sistema radicular e melhora na absorção de nutrientes. Além disso, a maior solubilidade dos corretivos contribui para o estabelecimento mais rápido de um ambiente químico favorável ao desenvolvimento e à atividade da microbiota do solo, a qual atua na solubilização de nutrientes e na promoção de condições mais adequadas ao desenvolvimento das plantas.

Segundo Fageria (2001), tais melhorias nas condições químicas e biológicas do solo favorecem o desenvolvimento vegetativo das plantas, o incremento da biomassa da parte aérea, a intensificação do florescimento e a maior formação de vagens, refletindo em elevações significativas na produtividade. Esse comportamento foi observado em todos os tratamentos que receberam

corretivos à base de hidróxidos, independentemente da dose ou granulometria utilizada, os quais apresentaram produtividades superiores a 3.070 kg ha⁻¹. Em contrapartida, entre os tratamentos com carbonatos, apenas o tratamento 13 (1.428 kg ha⁻¹ de carbonato em pó) alcançou produtividade semelhante, com 3.087 kg ha⁻¹.

Tabela 6: Parâmetros fitotécnicos da cultura da soja

Trat.	MSR	MSPA	MMG	NVP	PRODUTIVIDADE
	(g)	(g)	(g)		kg ha ⁻¹
Testemunha	2,02 d	16,3 b	159 a	50,5 b	2.890,2 b
476 kg ha ⁻¹ H. G.	2,85 b	16,2 b	166 a	55,5 b	3.102 a
952 kg ha ⁻¹ H. G.	3,09 a	17,7 b	162 a	63,5 a	3.175,6 a
1428 kg ha ⁻¹ H. G.	3,15 a	18,65 b	165 a	70,7 a	3.163,2 a
476 kg ha ⁻¹ H. P.	3,22 a	22,8 a	163 a	69,2 a	3.112,2 a
952 kg ha ⁻¹ H. P.	3,27 a	22,7 a	168 a	74 a	3.074,4 a
1428 kg ha ⁻¹ H. P.	3,20 a	22,4 a	167 a	70,7 a	3.145,8 a
476 kg ha ⁻¹ C. G.	2,43 c	16,43 b	154 a	53,5 b	2.797,2 b
952 kg ha ⁻¹ C. G.	2,43 c	15,4 b	160 a	52,5 b	2.797,2 b
1428 kg ha ⁻¹ C. G.	2,77 b	15,3 b	160 a	58,5 b	2.571 b
476 kg ha ⁻¹ C. P.	2,51 c	15,5 b	156 a	60,5 b	2.497,8 b
952 kg ha ⁻¹ C. P.	2,90 b	15,3 b	163 a	69 a	2.614,2 b
1428 kg ha ⁻¹ C. P.	2,70 b	21,9 a	165 a	72,1 a	3.087 a
Mistura biológica	1,99 d	17,9 b	161 a	51 b	2.872,8 b
CV (%)	9,99	11,22	5,75	17,82	10,73

MSR – Massa seca das raízes (R1); **MSPA** – Massa seca da parte aérea (R1); **MMG** – Massa de mil grãos; **NVP** – Número de vagens por planta (R6). As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. H.G.: hidróxidos em grânulos; H.P.: hidróxidos em pó; C.G.: carbonatos em grânulos; C.P.: carbonatos em pó.

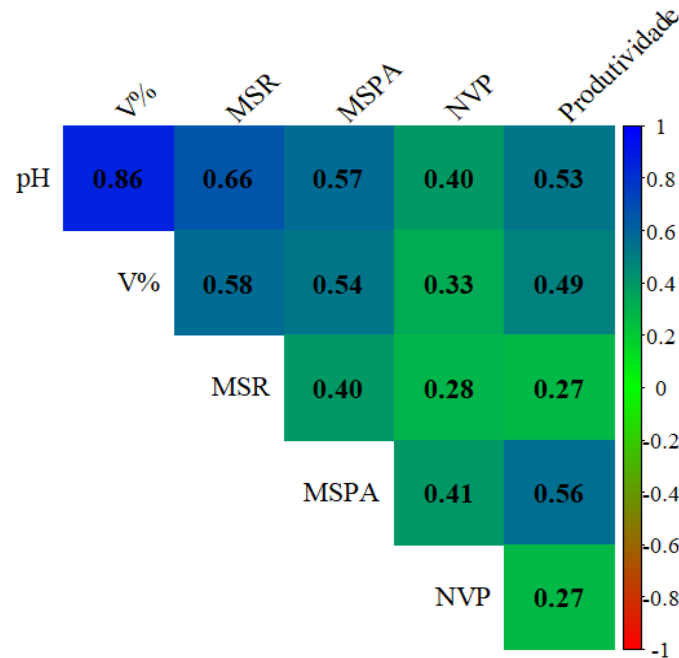
Fonte: do autor, 2025.

A Figura 25 apresenta a correlação entre o pH e a saturação por bases do solo com variáveis relacionadas ao desenvolvimento da cultura da soja, incluindo massa seca de raízes (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA), número de vagens por planta (NVP) e produtividade. Corroborando o que foi descrito por Fageria (2001), observa-se que tanto o pH quanto a saturação por bases apresentam forte correlação com os atributos de crescimento e produtividade da soja, indicando que a melhoria das condições químicas do solo favorece o desempenho fisiológico e produtivo da cultura da soja.

A Figura 25 destaca que a neutralização da acidez, expressa pelo aumento do pH e pela elevação da saturação por bases, promove melhores condições de desenvolvimento para cultura.

Como consequência, as plantas apresentam maior vigor, maior acúmulo de biomassa e melhor formação de estruturas reprodutivas, resultando em incrementos na produtividade.

Figura 25: Correlação entre variáveis químicas (pH e V%) e parâmetros fitotécnicos da soja.



V%: Saturação por bases; MSR: Massa seca da raiz; MSPA: Massa seca da parte aérea; NVP: número de vagens por planta. Valores de p obtidos pelo teste de correlação de Pearson (significativos $p < 0,05$): pH e V% = 1.68×10^{-13} ; pH e MSR = 1.84×10^{-6} ; pH e MSPA = 7.48×10^{-5} ; pH e NVP = 9.67×10^{-3} ; pH e Produtividade = 3.00×10^{-4} ; V% e MSR = 6.88×10^{-5} ; V% e MSPA = 2.36×10^{-4} ; V% e NVP = 3.51×10^{-2} ; V% e Produtividade = 8.99×10^{-4} ; MSR e MSPA = 8.77×10^{-3} ; MSR e NVP = 4.06×10^{-2} ; MSR e Produtividade = 4.95×10^{-2} ; MSPA e NVP = 7.15×10^{-3} ; MSPA e Produtividade = 1.00×10^{-4} ; NVP e Produtividade = 5.01×10^{-2} .

Fonte: do autor, 2025.

10. Análise de rentabilidade parcial

Na análise de rentabilidade parcial, considerando o custo dos corretivos aplicados (Tabela 7), demonstrou que o aumento da produtividade não se traduziu necessariamente em maior eficiência financeira. Para o cálculo dos custos, foi considerado o valor médio de R\$ 200,00 t^{-1} para os carbonatos e R\$ 1.100,00 t^{-1} para os hidróxidos, com base em dados de mercado disponibilizados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025).

Embora o tratamento com hidróxido na maior dose tenha proporcionado a maior receita bruta (R\$ 6.912,56), a testemunha apresentou a maior receita líquida (R\$ 6.333,39). Esse resultado indica que o custo associado aos tratamentos com hidróxido foi significativamente elevado, variando entre R\$ 952,00 e R\$ 2.856,00 ha^{-1} . Dessa forma, o aumento da produtividade obtido com a aplicação do

insumo não foi suficiente para compensar o investimento realizado, resultando em redução da rentabilidade econômica. Consequentemente, observou-se que a receita líquida diminuiu à medida que as doses de hidróxido aumentaram, evidenciando uma relação inversa entre o investimento no insumo e a lucratividade final.

Entretanto, é importante considerar que os resultados econômicos apresentados refletem apenas uma única safra agrícola. Durante o período experimental, a cultura foi severamente afetada por déficit hídrico, o que provavelmente limitou a expressão do potencial produtivo da cultura. Além disso, diferentemente de fertilizantes de efeito a curto prazo, a aplicação de corretivos de acidez e condicionadores de solo tem como principal objetivo promover maiores melhorias no ambiente químico do solo em médio e longo prazo. A neutralização da acidez e a disponibilização de cátions básicos, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , apresentam efeito residual que pode persistir por várias safras subsequentes, dependendo das condições de manejo e das características do solo (Natale *et al.*, 2007; Raij, 2011).

Nesse contexto, a análise de rentabilidade econômica baseada em apenas um ciclo produtivo pode subestimar os benefícios reais da aplicação desses insumos. Isso ocorre porque o custo da aplicação dos corretivos foi integralmente contabilizado nesta safra. Entretanto, do ponto de vista agrônomo e econômico, esse investimento tende a ser diluído ao longo das safras subsequentes, uma vez que os efeitos da correção da acidez do solo permanecem ativos por vários ciclos produtivos, sem necessidade de reaplicação imediata (Alcarde, 2005; Raij, 2011).

Tabela 7: Análise de rentabilidade econômica parcial em função da aplicação de diferentes doses de hidróxidos e carbonatos

TRATAMENTO	PRODUTIVIDADE (kg ha ⁻¹)	RECEITA BRUTA (R\$)	CUSTO DO TRATAMENTO (R\$)	RECEITA LÍQUIDA (R\$)
Testemunha	2.890	R\$ 6.333,39	-	R\$ 6.333,39
476 kg ha ⁻¹ H.	3.107	R\$ 6.808,69	R\$ 952,00	R\$ 5.856,69
952 kg ha ⁻¹ H.	3.124	R\$ 6.848,13	R\$ 1.904,00	R\$ 4.944,13
1428 kg ha ⁻¹ H.	3.154	R\$ 6.912,56	R\$ 2.856,00	R\$ 4.056,56
476 kg ha ⁻¹ C.	2.647	R\$ 5.801,55	R\$ 523,60	R\$ 5.277,95
952 kg ha ⁻¹ C.	2.705	R\$ 5.929,09	R\$ 1.047,20	R\$ 4.881,89
1428 kg ha ⁻¹ C.	2.829	R\$ 6.199,28	R\$ 1.570,80	R\$ 4.628,48

C.: carbonatos; H.: hidróxidos. Os valores dos custos dos tratamentos consideraram o valor dos corretivos e a dose aplicada por hectare.

Fonte: do autor, 2026.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no estudo realizado, verificou-se que os corretivos compostos por hidróxidos apresentam maior eficiência na neutralização da acidez, promovendo respostas mais rápidas e efetivas na elevação do pH e no fornecimento de nutrientes. Além disso, observou-se que os corretivos com menor diâmetro de partículas apresentaram maior reatividade.

A aplicação dos corretivos nas menores doses contribuiu positivamente para a atividade biológica do solo, promovendo condições químicas mais favoráveis para o funcionamento e metabolismo dos microrganismos, o que evidencia a importância de um ambiente equilibrado para o desempenho eficiente dos insumos biológicos aplicados ao solo.

Consequentemente, a melhoria das condições químicas e biológicas do solo refletiu em resultados expressivos no desenvolvimento da cultura da soja, evidenciados pelo aumento do crescimento radicular, do número de vagens por planta e, por fim, da produtividade.

Conclui-se, portanto, a importância do manejo integrado do solo, considerando de forma sinérgica os aspectos químicos, físicos e biológicos.

Assim, recomenda-se que pesquisas futuras incorporem avaliações de maior duração, abrangendo diferentes ambientes, classes de solo e ciclos produtivos, a fim de validar e ampliar a aplicabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, J. C.; Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. 2. ed. São Paulo: **Associação nacional para difusão de adubos ANDA**, 2005. Boletim Técnico, n. 6. Disponível em: <https://anda.org.br/wp-content/uploads/2024/09/BT-6-%E2%80%93Corretivos-da-Acidez-dos-Solos-Caracteristicas-e-Interpretacoes-Tecnicas-2o-Edicao-1992.pdf>. Acesso em: ago. 2025.

ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringa, v. 33, n. 2, p. 341–347, 2011.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, p. 393–395, 1993.

ANTHONY, M. A.; BENDER, S. F.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. et al. Enumerating soil biodiversity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 33, e2304663120, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>.

ANTONIOLLI, Z. I.; KAMINSKI, J. Micorrizas. **Ciência Rural**, v. 21, n. 2, p. 177–184, 1991. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/ZXZ9DjFb9F8hVzwZQfj8MQ/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

AOYAMA, M.; ZHOU, B.; SAITOH, M.; YAMAGUCHI, N. Microbial biomass in soils with calcium accumulation associated with the application of composted lime-treated sewage sludge. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 52, n. 2, p. 177-185, 2006. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2006.00030.x. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1111/j.1747-0765.2006.00030.x?needAccess=true>. Acesso em: ago. 2025.

BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P.; FIGUEIREDO, S. R.; KLAUBERG, O. F. Efeito do monocultivo de Pinus e de queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no planalto sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 715-724, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000500007.

BALD, D. R.; RANGEL, C. P.; VARGAS, A.; GIRÃO, K. T.; PASSAGLIA, L. M. P. Microbiota do solo: a diversidade invisível e a sua importância. **Biodiverso**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 101-110, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/biodiverso/article/view/120742>. Acesso em: 17 jan. 2026.

BARTH, V. P.; REARDON, C. L.; COFFEY, T.; KLEIN, A. M.; McFARLAND, C.; HUGGINS, D. R.; SULLIVAN, T. S. Stratification of soil chemical and microbial properties under no-till after liming. **Applied Soil Ecology**, v. 130, p. 169–177, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.06.001>

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. Recomendações de calagem e adubação para o Estado do Pará. 2. ed. In: VELOSO, C. A. C.; BOTELHO, S. M.; RODRIGUES, J. E. L. F.; SILVA, R. A. (ed.). **Correção de acidez do solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 10, p. 121–131. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/218402/1/LV-RecomendacaoSolo-2020-123-133.pdf>. Acesso em: mar. 2024.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W. Uso de corretivos granulados na agricultura. Campinas: **Informações agronômicas**, n. 154, p.17-21, jun. 2016. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/iabrasil.nsf/0/AFC5E096A1D1AABF83257FE7004DB5A9/\\$FILE/Page17-21-154.pdf](http://www.ipni.net/publication/iabrasil.nsf/0/AFC5E096A1D1AABF83257FE7004DB5A9/$FILE/Page17-21-154.pdf). Acesso em: mar. 2024.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. D.; REIS, E. F. D.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. D. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 147–157, 2009.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. D.; REIS, E. F. D.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 147–157, 2009.

CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Consulta ao Banco de Dados**. Disponível em: <https://cepea.org.br/br/consultas-ao-banco-de-dados-do-site.aspx>. Acesso em: mar. 2026.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 2025. **Preço fertilizantes**. <https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>. Acesso em: mar. 2026.

CHEN, Q.; SONG, Y.; AN, Y.; LU, Y.; ZHONG, G. **Soil microorganisms: their role in enhancing crop nutrition and health**. Diversity, Basel, v. 16, n. 12, p. 734, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/d16120734>. Acesso em: 29 out. 2025.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 317-326, 2004.

CLARK, R. B. Arbuscular mycorrhizal adaptation, spore germination, root colonization, and host plant growth and mineral acquisition at low pH. **Plant & Soil**, v. 192, n. 1, p. 15-22, 1997.

COELHO, F. S. **Fertilidade do solo**. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384 p. Disponível em: [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=\(autoria:%22COELHO,%20F.%20S.%22\)](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=(autoria:%22COELHO,%20F.%20S.%22)). Acesso em: Jan. 2025.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Estimativa da produção de soja na safra 2024/2025**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra>. Acesso em: 18 out. 2025.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira grão**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. Conab, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: fev. 2024.

CONAB. **Evolução dos custos de produção de soja no Brasil**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, v. 2, 2016.

COVACEVICH, F.; ECHEVERRÍA, H. E.; PAGANO, M. C. Arbuscular mycorrhizal fungi: essential belowground organisms for earth life but sensitive to a changing environment. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 1-20, 2021. DOI: 10.3389/fmicb.2021.720494. Acesso em: jun. 2025.

DALL'AGNOL, A. **A Embrapa Soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil: histórico e contribuições**. Brasília: Embrapa, v. 2, 2016.

DALL'AGNOL, A. A soja no Brasil: evolução, causas, impactos e perspectivas. **Mercosoja**, 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/906861/1/amelio soja.2011.pdf>. Acesso em: fev. 2025.

DÖBEREINER, J.; **Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil**. Rio de Janeiro: mar. 1990, p. 9. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/xWNT7xBGQmpczqV3QzwgXL/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: mai. 2024.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2011. 230 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77712/1/Manual-metodos-analis-solo-2.ed.pdf>. Acesso em: jul. 2025.

EMBRAPA. **Características e estádios de desenvolvimento da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-soja>. Acesso em: 18 out. 2025.

EMBRAPA. **Descrição botânica da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 1979. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/739627/1/Circular7.pdf>. Acesso em: 18 out. 2025.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 8, nov. 2010.

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. A.; CASSOL, P. C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 393-402, 2007.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 11, p. 1517-1525, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/RxtHTx7ZNwLt8hHrvpjwNTS/>. Acesso em: abr. 2025.

FANG, L.-L.; LIU, Y.-J.; WANG, Z.-H.; LU, X.-Y.; LI, J.-H.; YANG, C.-X. Electrical Conductivity and pH Are Two of the Main Factors Influencing the Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in the Vegetation Succession Series of Songnen Saline-Alkali Grassland. **Journal of Fungi**, v. 9, n. 9, art. 870, 2023. DOI: 10.3390/jof9090870

FREITAS, M. C. M.; A cultura da soja no Brasil: O crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, n.12; 2011. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2011a/agrarias/a%20cultura%20da%20soja.pdf>. Acesso em: mar. de 2024.

GIRALDELI A. L.; **PRNT: o que é, e como calcular para economizar na compra do calcário.** Porto Alegre-RS, 2019: AEGRO. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/prnt/>. Acesso em: mar. 2024.

GOMES, E. A.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; LANA, U. G. de P.; NODA, R. W.; MARRIEL, I. E.; SOUZA, F. A. de. Influência do pH do solo na comunidade de fungos micorrízicos arbusculares associada a raízes de milho contrastantes para eficiência no uso de fósforo. **Embrapa Maize & Sorghum**, 2011. Disponível: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/903308/1/InfluenciapH.pdf>

GONZALEZ-ERICO, E.; KAMPRATH, E.J.; NADERMAN, G.C.; SOARES, W. V. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an oxisol of central Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.43, p. 1155-1158, 1979.

GOZANLEZ-ERICO, E.; KAMPRATH, E. J.; NADERMAN, G. C.; SOARES, W. V. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an oxisol of central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 1155-1158, 1979.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management.** Pearson Education, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366175716_Soil_Fertility_and_Fertilizers_by_John_L_Havlin_z-liborg. Acesso em: mar. 2025.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, p. 47–63, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225872054_Amelioration_of_Al_Toxicity_and_P_Deficiency_in_Acid_Soils_by_Additions_of_Organic_Residues_A_Critical_Review_of_the_Phenomenon_and_the_Mechanisms_Involved. Acesso em: mar. 2025.

HINSINGER, P.; PLASSARD, C.; JAILLARD, B.; DUFÉY, J. E. Mobilization of phosphorus in rhizosphere and uptake by plants. **Plant and Soil**, v. 245, n. 1, p. 35-47, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259383294_Origins_of_root-mediated_pH_changes_in_the_rhizosphere_and_their_responses_to_environmental_constraints_A_review. Acesso em: mar. 2025.

HORN, R. **Compressibility of arable land.** *Catena*, Reiskirchen, v. 11, supl., p. 53–71, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)80007-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)80007-9). Acesso em: jun. 2025.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS – IAC. Soja e Agrônomo, história de sucesso! **O Agrônomo**, Campinas, v. 52, n. 2, p. 35, 2000.

JOERGENSEN, R. G.; EMMERLING, C. Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their biomass, activity, and diversity in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, n. 3, p. 295-309, 2006. DOI: 10.1002/jpln.200521941.

LANDGRAF, L.; Fungo *Trichoderma* é aliado no controle biológico de doenças em culturas agrícolas, **Embrapa soja**, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/53541439/fungo-trichoderma-e-aliado-no-controle-biologico-de-doencas-em-culturas-agricolas>. Acesso em: mai. 2024.

LUCON, C. M. M.; CHAVES, A. L. R.; BACILIERI, S. *Trichoderma*: o que é, para que serve e como usar corretamente na lavoura. **Instituto biológico**, São Paulo, 1 ed. 28 p. 2014. Disponível em: <http://www.biologico.sp.gov.br/uploads/files/pdf/cartilhas/trichoderma.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

MALAVOLTA, E. Manual de química agrícola: adubos e adubação. 3. ed. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1981.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 631 p.

MARTINS, C. E.; Práticas agrícolas relacionadas à calagem do solo. **Embrapa gado de corte**, dez. 2005, 6 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65417/1/COT-47-Praticas-agricolas-relacionadas.pdf>. Acesso em: mar. 2024.

MATSUMOTO, L. S.; MARQUES, R. D. **Bioindicadores da qualidade do solo**. In: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., Curitiba. Anais... Curitiba: SBCS, 2015. p. 486-490.

MELLO, J. C. A.; VILLAS BÔAS, R. L.; LIMA, E. V.; CRUSCIOL, C. A. C.; BÜLL, L. T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 553-561, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000300017. Acesso em: 19 de outubro de 2025.

MENDONÇA, E. D. S.; MATOS, E. D. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005.

MEYER, M. C.; BUENO, A. F. de; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da; Bioinsumos na cultura da soja. In: MAZARO, S. M.; SILVA, J. C.; MEYER, M. C.; BUENO, A. F. **Desafios na adoção de bioinsumos**. EMBRAPA, 2022. cap. 4, p. 3-12. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1147042/1/cap-4-Bioinsumos-na-cultura-da-soja.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 92, p. 1-8, 2000.

MONNERAT, R.; MONTALVÃO, S.; QUEIROZ, E. M.; QUEIROZ, P. M.; SILVA, E. Y. Y.; GARCIA, A.; CASTRO, M.; ROCHA, G. T.; FERREIRA, A. D. C.; GOMES, A. C. M. M. Manual de produção e controle de qualidade de produtos biológicos à base de bactérias do gênero *Bacillus* para uso na agricultura. Documentos/Embrapa, **Recursos Genéticos e Biotecnologia**, Brasília, mai. 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/213246/1/documentos-36916.pdf>.

MUMBACH, G.L.; GATIBONI, L.C.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SCHMITT, D.E.; GRANDO, D.L.; SOUZA JUNIOR, A.A.; BRIGNOLI, F.M.; IOCHIMS, D.A. Refining phosphorus fertilizer recommendations based on buffering capacity of soils from Southern Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, n.1, p.1-17, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbc20200113.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/biologia/livros/MICROBIOLOGIA%20E%20BIOQUIMICA%20DO%20SOLO.pdf>. Acesso em: 29 out. 2025.

ÖPIK, M.; VANATOVA, A.; VANATOVA, E.; MOORA, M.; DAVISON, J.; KALWIJ, J. M.; REIER, Ü.; ZOBEL, M. The online database MaarjAM reveals global and ecosystemic distribution patterns in arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). **New Phytologist**, Wiley, v. 188, n. 1, p. 223–241, 2010. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03334.x. Acesso: fev. 2026.

MyFarm AGRO. **Gráfico de Malavolta: A disponibilidade de nutrientes no solo em função do pH.** Disponível em: <https://blog.myfarmagro.com/grafico-de-malavolta-a-disponibilidade-de-nutrientes-no-solo-em-funcao-do-ph/>. Acesso em: dezembro de 2023.

BRUNDRETT, M. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 320, p. 37–77, 2009. Acesso em: fev. 2026.

NASA Langley Research Center. **NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer.** Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov>. Acesso em: ago. 2025.

NEUMAIER, N., NEPOMUCENO A. L., FARIAS, J. R. B., OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. **Embrapa Soja-Capítulo em livro científico**, 2001. 25p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/456809/1/ID-12906.pdf>. Acesso: 18 de out. 2025.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1999. p. 2-45.

NATALE, W.; PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M. Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1475-1485, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600024>. Acesso em: mar. 2026.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. **Embrapa soja**, 2000, p. 25. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/456809/1/ID-12906.pdf> Acesso em: abr. de 2024.

NOBILE, F. O.; ANUNCIACÃO, M. G.; MACHADO, P. C.; MASTRO R. S.; Doses de óxido de cálcio na produtividade e teor foliar de macronutrientes primários da couve-manteiga. **CBA Congresso brasileiro de agronomia**, Florianópolis, 7 p. out. 2021. Disponível em: <https://attitudepromo.iweventos.com.br/upload/trabalhos/t1arquivo/h4DizH6FYy0q3O4beHRELXTHKDM1.pdf> Acesso em: mar. 2024.

NUNES, J. L. da S. **Utilização de fungos micorrízicos arbusculares autóctones de pomares de pessegueiro para produção de mudas e estabelecimento em áreas novas e de replantio.** 2007. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

TEIXEIRA, P.C.; CAMPOS, D.V. B de.; SALDANHA, M.F.C. Fósforo disponível. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Brasília, DF: Embrapa -Solos, 2017. p. 95-115.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. C.; SILVA, A. C.; CURI, N.; GUILHERME, R. L. G.; RANGEL, O. J. P. Indicadores químicos de qualidade da matéria orgânica de solo da sub-bacia do Rio das Mortes sob manejos diferenciais de cafeeiro. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 7, p. 1808–1813, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/Nqrw7w4Vx64FQN8H7cjQjrg/>. Acesso em: 7 abr. 2025.

OLIVEIRA, V. C. **Atividade enzimática, população e análise de DNA da biodiversidade microbiana do solo em agroecossistemas do Semiárido**. 2004. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2004.

PANDOLFO, C. M.; TEDESCO, M. J. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 10, p. 753-758, out./1996. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab1996.v31.4545. Acesso em: 19 de outubro de 2025.

PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British Mycological Society**, London, v. 55, n. 1, p. 158-161, 1970. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/s0007-1536(70)80110-3)

PANDOLFO, C. M.; TEDESCO, M. J. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 10, p. 753-758, out. 1996. Disponível: <https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/4545/1831>. Acesso em: jan. 2025.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000.

QUÍMICA PARA ENGENHARIA AMBIENTAL. Aula Experimental nº 3. **Caracterização de Solos de Várias Origens**. Disponível em: <http://www.iqsc.usp.br/iqsc/servidores/docentes/pessoal/mrezende/arquivos/aula03.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2025.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/480310>. Acesso em: 29 out. 2025.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p. 2001. Disponível em: https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf. Acesso em julho de 2025.

RICHART, A.; FILHO, T. J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n3p321>. Acesso em: jun. 2025.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Rev. Econ. Sociol**, 2018. p. 18. Disponível em: doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201. Acesso em: abril de 2024.

SCHNEIDER, J. **Atributos microbiológicos de um Latossolo Bruno submetido a diferentes sistemas de manejo e calagem**. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2007.

SIEVERDING, E. **Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1991.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S. de; DE-POLLI, H. de. **Determinação do carbono da biomassa microbiana no solo (BMS-C)**. Comunicado técnico, n. 98, Seropédica/RJ, Embrapa Agrobiologia, ago. 2007. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAB-2010/34389/1/cot098.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2). **Seropédica: Embrapa Agrobiologia**, 2007. (Comunicado Técnico, 99). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/627577>. Acesso em: 28 out. 2025.

SILVA, J. L. **Os benefícios do uso de óxidos na produção agrícola**. Minas gerais, 2023. Disponível em: <https://www.gecal.com.br/os-beneficios-do-uso-de-oxidoss-na-producao-agricola>. Acesso em: fev. de 2024.

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURI, N.; ALVIM, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 1585–1592, 2010.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotechnology do solo: fundamentos e perspectivas**. Brasília: MEC/ABEAS/ESAL/FAEPE, 1988. 236 p.

SMITH, S. E.; READ, D. J. Mycorrhizal symbiosis. 2. ed. **New York: Academic Press**, 1997. 605 p.

SOARES, B. D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica**. 2007. 121 p. Dissertação (Mestrado em engenharia química) - Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15127/1/Parte%201.pdf> Acesso em: mar. 2024.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO-SBCS-PR. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Núcleo Estadual do Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - NEPAR – SBCS.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p. 205-274.

SOUZA, D. M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2007. P. 205-274.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and ^{14}C labelled cells. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, p. 337–343, 1988.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174 p.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C- CO_2 e N mineral de um podzólico vermelho-escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, 2000.

VELOSO, C. A. C.; ARAÚJO, S. M. B.; RODRIGUES, J. E. L. F.; SILVA, A. R. Correção da acidez do solo. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIEGAS, I. de J. M. (org.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 121-131.

VENZKE FILHO, S. de P. **Biomassa microbiana do solo sob sistema de plantio direto na região de Campos Gerais, Tibagi, PR**. 2003. 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, p. 29–38, 1934.

ZANON, A. J. et al. **Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades**. Santa Maria: Palloti, 2018.