



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

MAYNARA SANTOS GOMES

**PLANTAS JOVENS DE COQUEIRO ANÃO VERDE SUBMETIDAS À
ADIÇÃO DE GESSO E CALCÁRIO AGRÍCOLA CULTIVADOS NA
AMAZÔNIA ORIENTAL**

**BELÉM
2024**

MAYNARA SANTOS GOMES

**PLANTAS JOVENS DE COQUEIRO ANÃO VERDE SUBMETIDAS À
ADIÇÃO DE GESSO E CALCÁRIO AGRÍCOLA CULTIVADOS NA
AMAZÔNIA ORIENTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Pós-graduação em Agronomia: linha de pesquisa Manejo e Conservação de Recursos Ambientais, para obtenção do título de doutor.

Orientadora: Prof^a. Dra. Suzana Romeiro

Araújo

Coorientadora: Vânia Silva de Melo

**BELÉM
2024**

MAYNARA SANTOS GOMES

**PLANTAS JOVENS DE COQUEIRO ANÃO VERDE SUBMETIDAS À
ADIÇÃO DE GESSO E CALCÁRIO AGRÍCOLA CULTIVADOS NA
AMAZÔNIA ORIENTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Pós-graduação em Agronomia, para obtenção do título de doutora.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Suzana Romeiro Araújo

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Suzana Romeiro Araújo - Orientadora
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

Dr. Paulo Manoel Pontes Lins - 1º Examinador
EMPRESA SOCOCO S/A INDÚSTRIAS DA AMAZÔNIA

Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior - 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

Dr. Eduardo César Medeiros Saldanha- 3º Examinador
RIO TINTO DESENVOLVIMENTOS MINERAIS - LTDA

Dr^a. Saime Joaquina Souza de Carvalho Rodrigues - 4º Examinadora
CENTRO INTERNACIONAL DE INVESTIGAÇÃO FLORESTAL (CIFOR-ICRAF)

DEDICO

Aos meus pais e irmão, Maria das Graças Santos Gomes (in memorian), Paulo de Souza Gomes, Marcos Vinícius Santos Gomes e ao meu esposo, Leonam Moscoso. Saibam que vocês são a razão para as quais continuo minha jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa senhora de Nazaré, por iluminarem meu caminho, intercedendo em minhas escolhas e por dar-me forças para sempre seguir em frente;

À Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade de ser integrante de seu corpo discente;

Ao centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pela concessão de bolsa de estudos;

À Empresa Sococo S/A Indústrias da Amazônia pelo financiamento do trabalho, em especial ao Dr. Paulo Lins e aos colaboradores Lucas Bastos, Samuel Cohen, Leandro Silva, Anderson Cravo, Benedito Nascimento, Lucas Almeida, Lucas Araújo, Mauricio Machado, Wellison Silva, Eide Conceição e Marcus Silva, por toda ajuda ao longo do desenvolvimento da pesquisa;

A Dra. Suzana Araújo e Dr. Mário Lopes que estiveram presentes durante o desenvolvimento desta pesquisa, agradeço pela orientação, incentivo, confiança e aprendizado;

Aos meus pais, Paulo Souza e Graça Gomes (in memoriam), por todo o apoio, atenção e dedicação durante todos os dias de minha vida, por sempre me acolherem nos momentos difíceis e serem meu espelho de pessoas integras e profissionais;

Ao meu irmão, Marcos Vinícius Gomes, e meu companheiro, Leonam Moscoso, por todo o suporte, companheirismo, amizade durante o processo de desenvolvimento deste trabalho, e por sempre acreditarem na minha competência e potencial;

Às minhas amigas, Ana Renata Moraes e Mila Façanha por todo apoio e companheirismo durante todos esses anos, sua parceria e disponibilidade foram de grande importância para a realização deste trabalho;

Aos amigos e companheiros de laboratório, Natália de Paula, Jonathan Marques, Victor Dias, Mayane Pantoja, Paulo Moi, Gabriel Moura e Emilly Almeida, por todo auxílio prestado durante o desenvolvimento das análises e pesquisa em campo;

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

Lista de figuras e tabelas

CONTEXTUALIZAÇÃO

Figura 1. Mapa referente à área experimental 19

1. GESSO AGRÍCOLA COMBINADO COM CALCÁRIO PROPORCIONA MELHORES CONDIÇÕES PARA O CULTIVO DO COQUEIRO ANÃO-VERDE EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Figura 1. Precipitação mensal e temperaturas máximas e mínimas durante o período experimental 28

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico antes da instalação do experimento, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm 29

Figura 2. Influência das doses de calcário e gesso na concentração do potencial hidrogeniônico – pH (A), saturação por bases -V% (B), cálcio trocável – Ca^{+2} (C), magnésio trocável– Mg^{+2} (D), enxofre – S (E), alumínio trocável - Al^{+} (F), acidez potencial -H+Al (G), saturação por alumínio - m% (H), cobre – Cu (I), no solo 6 meses após aplicação dos tratamentos 31

Figura 3. Influência das doses de calcário e gesso na concentração do potencial hidrogeniônico – pH (A), saturação por bases -V% (B), cálcio trocável – Ca^{+2} (C), magnésio trocável– Mg^{+2} (D), enxofre – S (E), alumínio trocável - Al^{+} (F), acidez potencial -H+Al (G), saturação por alumínio - m% (H), cobre – Cu (I), no solo 12 meses após aplicação dos tratamentos..... 32

Tabela 2. Equações de regressão com coeficientes de determinação significativos ($p \leq 0,01$) entre cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Saturação por bases (V%), Acidez total (H+Al), Alumínio trocável (Al+), Saturação por bases (m%), Cobre (Cu) e enxofre (S) no solo 33

Tabela 3. Equações de regressão com coeficientes de determinação significativos ($p \leq 0,01$) potencial hidrogeniônico (pHCaCl_2), potássio (K), cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Acidez total (H+Al), Alumínio trocável (Al+), capacidade de troca de cátions (CTC), Saturação por bases (V%), Saturação por bases (m%), enxofre (S), boro (B), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e fósforo (P) no solo34

Figura 4. Influência das doses de gesso e calcário na concentração de nitrogênio - N (A), fósforo - P (B), potássio - K (C), cálcio - Ca (D), magnésio - Mg (E) e enxofre - S (F) no tecido foliar de plantas jovens de coqueiro anão verde em dois períodos de avaliação 40

Figura 5. Influência das doses de gesso e calcário nas concentrações de boro – B (A), cobre - Cu (B), ferro - Fe (C), manganês – Mn (D), zinco – Zn (E), sódio – Na (F), cloro – Cl (G) e alumínio – Al (H) no tecido foliar de plantas jovens de coqueiro anão verde em dois períodos de avaliação 42

Figura 6. Influência das doses de calcário e gesso no comprimento de raiz principal (cm), comprimento de raízes finas e largura das raízes finas (cm) em análise de rizotron de plantas jovens de coqueiro anão verde em dois períodos de avaliação 44

2. GESSO AGRÍCOLA COMBINADO COM CALCÁRIO PARA QUALIDADE QUÍMICA DE UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA

Figura 1. Precipitação mensal e temperaturas durante o período experimental 51

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico antes da instalação do experimento, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 52

Figura 2. Mapa referente a área experimental 53

Figura 3. Concentração de fósforo(P), potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) e em um Neossolo Quartzarênico em um perfil de 0-80 cm em função das doses de gesso 56

Figura 4. Índice de Qualidade do solo (IQS) e os dois grupos de fatores formados com os atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico em função da aplicação de gesso e os dois grupos de fatores formados. Fósforo (P), saturação por alumínio (m), potássio (K), enxofre (S), magnésio (Mg), saturação por bases (V) 60

Figura 5. Gráfico de mapa de calor com propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico submetidos a aplicação superficial de gesso agrícola. O dendrograma acima do mapa de calor representa os agrupamentos com base em padrões semelhantes de variação. Fosforo (P), saturação por alumínio (m), potássio (K), enxofre (S), magnésio (Mg), saturação por bases (V), em função das doses de gesso aplicados 62

3. DINÂMICA DO CARBONO NO SOLO EM CULTIVO DE COQUEIRO ANÃO VERDE SOB APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Tabela 1. Características biológicas, químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico antes da instalação do experimento, nas camadas 0-5 e 5-10cm 72

Figura 1. Mapa referente a área experimental 72

Figura 2. Precipitação mensal, temperaturas e meses de coleta de solo durante o período experimental 73

Figura 3. Comparação dos valores de carbono orgânico do solo (Corg) antes e após aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário, T1:4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. * indica diferença significativa a $p \leq 0,05$, ns indica ausência de significância (Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%) 78

Figura 4. Comparação dos valores de carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) antes e após aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário, T1:4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. * indica diferença significativa a $p \leq 0,05$, ns indica ausência de significância (Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%) 80

Figura 5. Comparação dos valores quociente metabólico (qCO_2) antes e após aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário, T1:4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. * indica diferença significativa a $p \leq 0,05$, ns indica ausência de significância (Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%). Nota: Os valores de quociente metabólico foram multiplicados por 10^5 para facilitar a representação gráfica 81

Figura 6. Comparação do Carbono oxidável por permanganato de potássio (C-POx) antes e com diferentes tempos pós aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário, T1:4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. *- significativo a $p \leq 0,05$, ns- não significativo. Teste de Dunnett, com nível de significância de 5% 83

Lista de siglas

pH – Potencial hidrogeniônico;
H+Al – Acidez potencial;
Ca⁺² – Íon cálcio;
Mg⁺² – Íon magnésio;
Al⁺³ – Íon alumínio;
K⁺ – Íon potássio;
P – Fósforo disponível;
N – Nitrogênio;
S – Enxofre;
B – Boro;
Cu – Cobre;
Mn – Manganês;
Cr – Cromo;
Fe – Ferro;
Cl – Cloro;
Zn – Zinco;
Corg – Carbono orgânico;
CTC – Capacidade de troca de cátions;
V% – Saturação por bases;
m% – Saturação por alumínio;
CBM – Carbono da Biomassa Microbiana do solo;
CO₂ – Dióxido de Carbono;
C-POX – Carbono oxidável do solo;
KMnO₄ – Permanganato de potássio;
MO – Matéria Orgânica;
qCO₂ – Quociente Metabólico;
qMIC – Quociente Microbiano;
RBS – Respiração Basal do solo;
P.A – Pureza analítica.

Sumário

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.1 Cultura do coqueiro	11
1.2 Importância econômica mundial	11
1.3 Mercado de coco no Brasil, na região Norte e estado do Pará	12
1.4 Condições edafoclimáticas e suas limitações para a cultura	13
1.5 Tipo de solo para cultivo do coqueiro	15
1.6 Nutrição e adubação para o coqueiro.....	16
1.7 Qualidade do solo em sistemas produtivos	16
1.8 Impactos benéficos do uso de gesso e calcário agrícola em plantações de coqueiro	17
1.10 Características da área de estudo	18
1.11 hipótese e objetivo	19
Referências.....	20
2. APLICAÇÕES DE GESSO E CALCÁRIO MELHORAM A FERTILIDADE DO SOLO SOB CULTIVO DE COCO NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL	26
2.1 Introdução	27
2.2 Material e métodos	27
2.3 Resultados e discussão	30
2.4 Conclusões	45
Referências	46
3. IMPACTO DO GESSO AGRÍCOLA E CALCÁRIO NA QUALIDADE QUÍMICA DE UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA	49
3.1 Introdução.....	50
3.2 Material e métodos	51
3.3 Resultados e discussão	55
3.4 Conclusões	63
Referências.....	64
4. DINÂMICA DO CARBONO NO SOLO EM CULTIVO DE COQUEIRO ANÃO VERDE SOB APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO NA AMAZÔNIA ORIENTAL	69
4.1 Introdução.....	70
4.2 Material e métodos	71
4.3 Resultados e discussão	76
4.4 Conclusões	84
Referências.....	84

RESUMO

O cultivo de coqueiro (*Cocos nucifera* L.) apresenta grande destaque no mercado agrícola por agregar valores socioeconômicos para o mercado nacional. Em 2022, no Brasil, áreas cultivadas com coco atingiram 188 mil hectares, com produção de aproximadamente 2,33 milhões de toneladas. A região norte do Brasil ocupa o terceiro lugar como produtora, apresentando produtividade de 175.022 toneladas com 9,9 mil frutos por hectare. Por se tratar de uma planta que apresenta crescimento e produção contínuos, muitos são os fatores limitantes para o seu pleno desenvolvimento e produtividade. Dentre estes, destaca-se a acidez do solo, causada pela elevada concentração de alumínio e baixa saturação de bases no solo, características predominantes em solos Amazônicos. Uma das técnicas utilizadas para correção da acidez do solo é a calagem, no entanto, devido à baixa solubilidade e mobilidade de carbonato no perfil do solo, os efeitos da calagem se limitam as camadas superficiais do solo. Neste contexto, uma alternativa de mitigar a toxidez do solo em subsuperfície é a aplicação do gesso agrícola em associação a calagem. O gesso atua reduzindo os teores de Al^{3+} e elevando os teores de Ca^{2+} , o que melhora o ambiente radicular em profundidade. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito do gesso e do calcário aplicados de forma isolada e conjunta, com diferentes tempos de reação no solo, nas propriedades químicas e biológicas do solo, no crescimento e na resposta nutricional de plantas de coqueiro anão verde cultivadas no estado do Pará. Foi realizado um experimento no município de Santa Isabel no estado do Pará, na fazenda Reunidas Sococo. O delineamento experimental foi em blocos inteiramente casualizados (BIC), sendo 4 blocos e 7 tratamentos: T1 = controle; T2 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário; T3 = 500 kg ha⁻¹ de gesso; T4 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 300 kg ha⁻¹ de gesso; T5 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 500 kg ha⁻¹ gesso; T6 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 700 kg ha⁻¹ gesso; T7 = 2000 kg ha⁻¹ calcário e 1000 kg ha⁻¹ gesso. Após a análise de atributos químicos do solo, bem como do desenvolvimento das partes aérea e radicular das plantas e, da análise nutricional do tecido vegetal, observou-se que a aplicação de gesso agrícola associada ao calcário foi uma estratégia eficiente para melhorar as variáveis avaliadas. Calculou-se o índice de qualidade dos atributos químicos do solo a fim de verificar qual a melhor combinação de gesso e calcário. A concentração que apresentou maior influência na saturação por alumínio, na saturação por bases e em alguns macronutrientes do solo foi de 500 kg ha⁻¹ de gesso associada a 2000 kg ha⁻¹ de calcário. Essa combinação resultou em uma melhora significativa da qualidade química do Neossolo Quartzarênico cultivado com plantas jovens de coqueiro, além de apresentar aumentos notáveis em variáveis individuais como fósforo (P), potássio (K), enxofre (S) e magnésio (Mg). A adição de gesso reduziu a saturação por alumínio. A aplicação em dose adequada de gesso otimizou a mobilidade de nutrientes no perfil do solo, contribuindo para uma maior disponibilidade de nutrientes nas camadas mais profundas do solo. A dinâmica do carbono no solo apresentou efeito significativo ao longo do tempo do experimento, apresentando variações positivas nos teores de Carbono orgânico, carbono oxidável, quociente metabólico e carbono da biomassa microbiana. Sendo o carbono orgânico a variável que apresentou maiores concentrações após aplicação de gesso em solos cultivados com plantas jovens de coqueiro anão verde.

Palavras chave: Fertilidade do solo, *Cocos nucifera* L, qualidade do solo, condicionador do solo, desenvolvimento radicular, nutrição de plantas

ABSTRACT

The cultivation of coconut trees (*Cocos nucifera* L.) has great prominence in the agricultural market, as it adds socioeconomic values to the national market. In 2022, in Brazil, areas cultivated with coconut reached 188 thousand hectares, with production of approximately 2.33 million tons. The northern region of Brazil occupies the third place as a producer, with productivity of 9.9 thousand fruits per hectare. As it is a plant that presents continuous growth and production, there are many limiting factors for its full development and productivity. Among these, the acidity of the soil stands out, caused by the high concentration of aluminum and low saturation of bases in the soil, predominant characteristics in Amazonian soils. One of the techniques used to correct soil acidity is liming, however, due to the low solubility and mobility of carbonate in the soil profile, the effects of liming are limited to the surface layers of the soil. In this context, an alternative to mitigate soil toxicity in subsurface is the application of agricultural gypsum in association with liming. The gypsum works by reducing the levels of Al^{3+} and raising the levels of Ca^{2+} , which improves the root environment in depth. The objective of this study was to evaluate the effect of gypsum and limestone applied in isolation and together, with different soil reaction times, on soil chemical properties, growth and nutritional response of green dwarf coconut plants from Brazil, cultivated in the state of Pará. An experiment was carried out in the municipality of Santa Isabel in the state of Pará, at the Reunidas Sococo farm. The experimental design was in completely randomized blocks (BIC), with 4 blocks and 7 treatments: T1= control; T2= 2000 kg ha⁻¹ of limestone; T3= 500 kg ha⁻¹ of gypsum; T4= 2000 kg ha⁻¹ of limestone + 300 kg ha⁻¹ of gypsum; T5= 2000 kg ha⁻¹ limestone + 500 kg ha⁻¹ gypsum; T6 = 2000 kg ha⁻¹ limestone + 700 kg ha⁻¹ gypsum; T7= 2000 kg ha⁻¹ limestone and 1000 kg ha⁻¹ gypsum. After the analysis of soil chemical attributes, as well as the development of the aerial and root parts of the plants, and the nutritional analysis of the plant tissue, it was observed that the application of agricultural gypsum associated with limestone was an efficient strategy to improve the variables evaluated. After the regression analysis, the quality index of the soil chemical attributes was calculated in order to verify the best combination of gypsum and limestone. The concentration that most influenced aluminum saturation, base saturation and some soil macronutrients was 500 kg ha⁻¹ gypsum associated with 2000 kg ha⁻¹ limestone. For the analysis of the soil chemical quality index, it was observed that the application of 500 kg ha⁻¹ was the dose that provided the best chemical quality of a Quartzarenic Neosol cultivated with young coconut plants, as well as higher levels of individual variables (P, K, S and Mg). The addition of gypsum reduced the saturation by aluminum. The application of an adequate dose of gypsum optimized the mobility of nutrients in the soil profile, contributing to a greater availability of nutrients in the deeper layers of the soil. The dynamics of soil carbon showed a significant effect over the time of the experiment, showing positive variations in the contents of organic carbon, oxidizable carbon, metabolic quotient and carbon of microbial biomass. Organic carbon was the variable that presented the highest concentrations after gypsum application in soils cultivated with young green dwarf coconut plants.

Keywords: Soil fertility, *Cocos nucifera* L, soil quality, soil conditioner, root development, plant nutrition

CONTEXTUALIZAÇÃO

A Cultura do coqueiro

O gênero cocos é constituído pelo coqueiro (*Cocos nucifera* L), o qual é uma espécie diploide com 32 cromossomos, pertencente ao gênero Cocos da família das Aceraceae. A cultura é composta por três variedades usadas comercialmente, *Cocos nucifera* var. *typica* (Coqueiro gigante), *Cocos nucifera* var. *nana* (Coqueiro anão) e a *Cocos nucifera* var. *Aurantiaca* (Coqueiro intermediário), as quais aparentam destaque do ponto de vista socioeconômico e agroindustrial, no Brasil encontra-se somente as variedades *typica* e *nana*. A variedade *nana* é composta por cultivares amarela, vermelha e verde, as quais são distinguidas pela coloração do pecíolo, da raquis da folha, e principalmente pela cor do epicarpo do fruto (Liyanage, 1958; Sisunandar et al., 2010; Benassi et al., 2013).

A variedade anão verde é amplamente difundida no Brasil, sendo a variedade que apresenta maior aceitação do fruto no mercado de água de coco. Essa variedade apresenta produção em torno de 130 a 150 frutos por planta por ano com um rendimento de 300 ml de água por fruto e com qualidade sensorial superior as outras cultivares de coqueiro, além de apresentar vida útil de até 40 anos de plena produção (Alves et al., 2018; Baptistella, Coelho, 2021).

A espécie *Cocos nucifera* L é uma palmeira difundida principalmente em regiões intertropicais, devido às condições edafoclimáticas exigidas pela cultura. Sua origem ocorreu no sudeste Asiático, entre as ilhas do oceano indico e Oceano Pacífico, foi posteriormente levada para África e em seguida para a América, passando a ser cultivada nas regiões tropicais do globo terrestre (Comério et al., 2012). Os primeiros indícios de cultivo de coqueiro no Brasil foram em meados de 1950 no estado da Bahia, com material genético proveniente da ilha de Cabo Verde, por este motivo é chamado algumas vezes de coco-da-baía por ser o estado da Bahia o pioneiro na produção de coco brasileiro (Nucé de Lamothe, 198; Brainer, 2021).

O cultivo do coqueiro tem caráter de subsistência para a população no sudeste da Ásia, na África e alguns países da América Latina, sendo considerada uma cultura de caráter empresarial e familiar com grande importância socioeconômica, devido sua contribuição para a geração de emprego para os estados e países produtores (Oduro-Yeboah et al., 2020).

Importância econômica mundial

O coqueiro é uma palmeira com grande distribuição de plantio em todo o mundo, sendo

cultivado em mais de 200 países, incluindo ilhas asiáticas, América Latina, Caribe e África Tropical. No entanto, devido às condições climáticas necessárias para o cultivo, a exploração comercial do coqueiro se limita em 86 países (Rocha et al., 2021).

Grande parte da produção de coco localiza-se nos países asiáticos, sendo a Indonésia o país que mais produz coco no mundo, seguido pelas Filipinas e Índia (FAO, 2022). Estes três países ocupam 73% de área plantada e participam com 74,1% da produção mundial. A área mundial colhida com coco é de 11,8 milhões de hectares, produzindo 62,9 milhões de toneladas de frutos (USDA, 2021). No entanto, o rendimento mundial nos pomares de coco não evoluiu no período de 2009 a 2019, resultando em um decréscimo de 0,1% apesar da área e a produção mundial de coco crescerem 0,3% e 0,2%, respectivamente (Brainer, 2021). Essas taxas podem ser justificadas devido à cultura ser explorada de forma quase extrativista por pequenos produtores, que detém a maior parcela da produção de coco (85%) e apresentam limitação de recursos para investimento em tecnologia (Rocha et al., 2022).

Mercado de coco no Brasil, na região Norte e estado do Pará

O coqueiro é de grande importância para produção agrícola brasileira, cuja produção no ano de 2022 foi de 1,8 bilhão de frutos e 1,55 milhão de toneladas em uma área plantada de 189,5 mil hectares, com rendimento médio de 9 mil frutos por hectare (IBGE, 2022). A expansão da atividade apresenta grandes avanços nos últimos anos, visto que na década de 90 a produção nacional de coco era de 477 mil toneladas (Jesus Junior et al., 2013), apresentando um incremento significativo em sua produção, fator que pode ser justificado pelo avanço da grande demanda do fruto verde, com interesse comercial na água de coco para consumo in natura e indústrias de envasamento (Alves, 2018).

Nesse contexto, o governo federal reconheceu a importância estratégica da cocoicultura para o desenvolvimento econômico e ambiental do país, instituindo, por meio da Lei nº 14.975/2024, a Política Nacional de Incentivo à Cocoicultura de Qualidade. Sancionada em 19 de setembro de 2024, apresentando um marco para o setor ao estabelecer diretrizes que visam não apenas o aumento da produtividade, mas também a promoção da sustentabilidade e da competitividade da produção de coco no Brasil.

Em escala global o Brasil é o 5º maior produtor de coco, sendo que a região Nordeste responde por 74% da produção nacional e as regiões Sudeste e Norte respondem por 13% e 12%, respectivamente (IBGE, 2022). Na região Norte, o estado do Pará tem a maior área cultivada com coco, totalizando 18.600 ha, sendo 93% da produção com rendimento médio de 9,35 t ha⁻¹ sendo o município de Moju o maior produtor da região (IBGE, 2022).

O Brasil apresenta uma particularidade com relação ao destino comercial dos produtos derivados do coqueiro. Enquanto mundialmente o coco é conhecido como uma oleaginosa, sendo processado majoritariamente em seu estágio final de maturação para a produção de óleo e outros produtos, no país, a produção se destina basicamente à comercialização *in natura* ou na forma de produto industrializado, como o coco ralado, leite de coco ou água de coco (Rocha et al., 2021).

A cadeia produtiva de coco no Brasil é composta por plantios destinados para a produção de coco seco que apresenta baixa rentabilidade, limitando a expansão da atividade e outros plantios destinados à produção de coco verde, que recebe maiores incentivos devido ao mercado de água de coco que está em constante expansão (Teixeira et al., 2005).

O mercado de água de coco é quase totalmente suprido por plantas da variedade anã. Estima-se que apenas 15% do mercado de água de coco seja suprido pelos plantios de coqueiro gigante (Lacerda et al., 2021) A água pode ser extraída do fruto e comercializada na forma congelada, resfriada, esterilizada, concentrada e desidratada (bebida não diluída e não fermentada, submetida a um processo adequado de desidratação cujo teor de umidade seja igual ou inferior a 3%) (Embrapa, 2018).

A cultura do coco é uma atividade econômica de destaque no Pará, estando entre os principais produtores a nível nacional, o estado é o terceiro maior produtor de coco do país, representando 9,6% da produção nacional (IBGE, 2022). Segundo a Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca (SEDAP), no ano de 2022, o total de área colhida foi de 17,4 mil, e o valor de produção foi de R\$215,5 milhões de reais. Nesse período, entre os municípios paraenses com maior destaque, o município de Moju registrou 79,5 milhões de frutos produzidos, seguido pelo Acará com 21 milhões e Capitão Poço com 9,4 milhões. Sendo assim, no estado do Pará o maior destaque se dá ao município de Moju, que lidera com 39% da área plantada, com rendimento médio de 10 mil frutos ha⁻¹ (IBGE, 2022).

Condições edafoclimáticas e suas limitações para a cultura

As plantas de coqueiro apresentam adaptabilidade a diversas condições edafoclimáticas, sendo uma planta essencialmente tropical, as condições climáticas propícias para o desenvolvimento está entre as latitudes 20° N e 20° S, com clima quente e úmido, com umidade do ar abaixo de 60% sendo prejudiciais para o desenvolvimento da cultura, exigindo poucas variações de temperatura com média anual de 27°C (Passos, 2016). A melhor adaptação dos coqueiros ocorre em solos leves e bem drenados, mas que disponibilizem para as plantas um bom suprimento de água. O deslocamento do cultivo do coqueiro no Brasil se

deu para Neossolos Quartzarênico no litoral nordestino, a maior parte do cultivo de coqueirais ocorre em solos de textura arenosa, que podem ocasionar limitação do seu pleno desenvolvimento, devido a baixos teores de matéria orgânica e nutrientes, baixa capacidade em retenção de água e lençol freático muito profundo (Cintra, 2016).

Sendo assim, para que a cultura apresente um bom desenvolvimento e consequentemente elevada produtividade, são necessárias interações positivas entre as características químicas do solo e o seu sistema radicular (Carducci et al., 2014). Portanto, é fundamental conhecer o tipo de solo em que as plantas estão se desenvolvendo para suprir as demandas nutricionais da cultura bem como para adotar medidas de manejo mais adequadas.

Na região amazônica predominam solos ácidos, com elevada saturação por alumínio, alto poder de lixiviação e, consequentemente, baixa capacidade de retenção de nutrientes (Wadt, 2021), sendo a acidez do solo um dos fatores mais limitantes no rendimento das culturas (Deus et al. 2014). Assim sendo, sua correção através da aplicação de óxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos capazes de neutralizar prótons da solução do solo são essenciais para melhorar o crescimento das culturas (Castro e Crusciol 2015).

Dentre os tipos de solos presentes na região, destacam-se os Neossolos Quartzarênicos que apresentam características texturais arenosas ou franco arenosas em uma camada de pelo menos 150 cm de profundidade. Estes, por sua vez, são muito suscetíveis a lixiviação, possuem baixa saturação por bases, baixa fertilidade natural, baixa capacidade de retenção de água e baixa capacidade de troca de cátions (Silva; Olivera Neto, 2021), e todas essas características são fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas.

Solos ácidos apresentam baixos teores de cálcio, magnésio e potássio, altos teores de alumínio e manganês e elevados níveis de íons de hidrogênio, que podem estar presentes nos colóides ou livres na solução do solo (Sousa, 2016). Assim, a acidez do solo é um fator limitante para o desenvolvimento das plantas, pois afeta diretamente o desenvolvimento e produtividade de diversas culturas, principalmente culturas que apresentam ciclos mais longos, tais como o coco.

Essa limitação ocorre principalmente em decorrência dos efeitos tóxicos de Al^{3+} , H^+ e Mn e pela baixa concentração de cálcio e magnésio que irão influenciar no posicionamento e número das células do tecido radicular, inibição da progressão do ciclo celular e da diferenciação celular (Oliveira, 2013), além do rompimento da homeostase de Ca^{2+} e o aumento na produção de etileno pela maior atividade da enzima AAC oxidase (Mattiello et al., 2010).

Tipo de solo para cultivo do coqueiro

A fácil adaptabilidade do coqueiro nos mais variados tipos de solos, torna difícil a determinação do solo ideal para cultura (Lins, 2000; Matias, 2005). No entanto, a preferência da cultura está em solos de textura franco arenosa, profundos, com boa porosidade que facilite a drenagem e aeração, e que proporcione o pleno desenvolvimento do sistema radicular (Benassi et al., 2015). Isso se deve ao fato que plantas de coqueiro não suportam solos excessivamente argilosos e que apresentem camadas compactadas que impeçam a penetração do sistema radicular (Medeiros et al., 2019)

De maneira geral, o cultivo de coqueiro no Brasil é realizado em solos que apresentam baixa fertilidade natural e, na maioria dos casos com o pH abaixo de 5,0, caracterizando-se como solos ácidos com limitação na disponibilidade de determinados elementos essenciais para a planta (Sanábio; Farias, 2024), sendo necessário a adubação complementar e correção da acidez, à exemplo os Neossolos Quartzarênicos.

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), os Neossolos Quartzarênicos são caracterizados como solos pouco desenvolvidos e evoluídos, com ausência de horizontes “B” diagnóstico. Por se tratar de solos provenientes de reservas arenosas, apresentam textura arenosa ou areia franca em todos os horizontes, com mais de 90% de quartzo e ausência de minerais primários alteráveis (Frazão et al., 2008). Os solos dessa classe apresentam baixos teores de matéria orgânica, deficiência de cálcio, magnésio e fósforo e, aliando-se à elevada concentração de alumínio e baixa capacidade de troca de cátions (CTC), mesmo no horizonte “A”, reduzindo em profundidade até o horizonte “C” (Prado, 2008; Carneiro et al., 2009). São constituídos basicamente por quartzo, desprovidos de minerais alteráveis, o que limita a reserva de nutrientes para as plantas. Assim, a reduzida capacidade de adsorção de nutrientes desta classe de solo implica em elevadas perdas de nutrientes por lixiviação, sobretudo quando adicionados via adubação mineral (Oliveira, 2008).

Nutrição e adubação para o coqueiro

Apesar de o Pará ocupar uma posição de destaque entre os principais produtores de coco no Brasil, o desenvolvimento sustentável dessa cultura ainda enfrenta desafios consideráveis no estado, notadamente pela escassez de dados específicos sobre nutrição e adubação em condições locais (Lins; Viegas, 2008), sobretudo no cultivo do coqueiro anão verde (Teixeira, 2005). Suprir essa escassez se faz importante para o desenvolvimento da cultura porque o manejo nutricional se configura como um dos fatores críticos para o vigor e produtividade das plantas, especialmente em culturas de interesse econômico (Prado, 2020). Nutrientes minerais

cumprem funções essenciais na proteção e desenvolvimento vegetativo, atuando como componentes estruturais, reguladores metabólicos e ativadores enzimáticos que favorecem a síntese de metabólitos de defesa (Cabot et al., 2019).

Os coqueiros, caracterizados por um crescimento contínuo e elevado, apresentam uma demanda nutricional expressiva em todas as fases de seu desenvolvimento (Lins et al., 2020). Assim, a nutrição adequada do coqueiro requer o fornecimento equilibrado de macro e micronutrientes (Wijebandara et al., 2014), sendo essa exigência ainda mais evidente na variedade anão verde, que, em razão de sua maior produtividade, necessita de aporte nutricional superior ao coqueiro gigante (Teixeira; Silva, 2003).

Neste cenário, o investimento em adubos químicos se torna substancial, dada a demanda elevada da cultura ao longo de todo o ciclo produtivo (Ferreira et al., 2018). O processo de adubação inicia-se ainda na fase de produção das mudas (Benassi et al., 2013) e, após o plantio no campo, torna-se indispensável a reposição anual dos nutrientes extraídos pela colheita (Sobral; Barros, 2018). Para assegurar uma adubação precisa, a análise química do solo e do tecido foliar se faz imprescindível (Sanábio; Farias, 2024). Ademais, a quantidade de nutrientes removidos pelas plantas não deve ser o único parâmetro para a adubação; é crucial considerar fatores como lixiviação e reações químicas subsequentes à aplicação dos nutrientes no solo, os quais podem influenciar significativamente a disponibilidade desses elementos para as plantas (Sobral; Barros, 2018).

Qualidade do solo em sistemas produtivos

Com o aumento da demanda de alimentos e biocombustíveis, tornou-se necessário a expansão da produção agrícola em larga escala (Davis et al., 2020; Ferraz et al., 2021). Isso levanta inúmeros estudos sobre a qualidade do solo, que está relacionada com os atributos químicos, físicos, biológico e com as práticas de uso e manejo (Zhang et al., 2021; Araújo et al., 2012; Rousseau et al., 2012).

Em plantio de monocultivo e de culturas perenes, como é o caso do coqueiro, as utilizações de fertilizantes e corretivas agrícolas ocorrem em grandes quantidades o que torna importante a avaliação da qualidade do solo, pois irá refletir na produção e produtividade da cultura. Além disso, é importante analisar a capacidade que a planta tem em explorar os nutrientes presentes no solo e se este solo está em condições ideais para o seu pleno desenvolvimento, visto que são plantas de vida útil econômica de 60 anos (Aragão et al, 2016; Cappeli et al., 2022; Suzuki et al., 2012).

A avaliação da qualidade ou saúde do solo tem se tornado uma alternativa muito eficaz.

Ela é capaz de definir a competência do uso e manejo adotado em um determinado sistema de cultivo, além de verificar o seu real potencial de se manter nas safras ou ciclos de culturas futuras. Dessa forma, a avaliação da qualidade do solo é um instrumento muito válido para espécies perenes que permanecem em campo por longos períodos (Bayer et al., 2018; Vezzani et al., 2019).

As propriedades dos indicadores de qualidade do solo são mensuráveis, podendo ser qualitativa ou quantitativa, envolvendo as alterações de solo e planta em um dado ecossistema (Karlen et al., 1997), por isso, a avaliação da qualidade do solo contribui para a compreensão dos limites de cada solo, assim como leva a esclarecer quais são as medidas necessárias para a sua recuperação em caso de degradação (Brady; Weil, 2013).

Impactos benéficos do uso de gesso e calcário agrícola em plantações de coqueiro

Solos ácidos apresentam duas principais origens que podem estar ligadas à sua natureza ou ao uso excessivo de operações agrícolas, como o uso de adubos nitrogenados (Paradelo et al., 2015), no qual durante o processo de nitrificação libera íons H^+ na solução do solo, ocasionando acidificação do meio (Snider et al., 2021). Esses solos tendem a apresentar aumento na lixiviação de muitos nutrientes essenciais às plantas e o aumento na disponibilidade de elementos tóxicos, modificando várias reações geoquímicas e biológicas no solo. Mas, embora os solos ácidos sejam menos férteis, a produtividade dos solos tropicais, cujos solos são ácidos, está entre as mais altas do mundo, pois uma vez eliminadas as restrições químicas através da aplicação de uma quantidade suficiente de corretivos agrícolas e fertilizantes, são altamente produtivos (Mahmud; Chong, 2022).

Dessa forma, uma das alternativas para o controle da acidez do solo é a prática da calagem, que geralmente é realizada em superfície, sem incorporação e parcelada ao longo do tempo (Dalla Nora et al. 2013). O calcário é capaz de alterar inúmeras propriedades geoquímicas e biológicas do solo e proporcionar uma variedade de benefícios (Li et al., 2019; Kalkhoran et al., 2021). Assim, desempenha papel na redução da acidez do solo, na solubilização de elementos tóxicos para as plantas, como é o caso do alumínio (Al) e manganês (Mn), além disso, auxilia no aumento dos níveis de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e na disponibilidade de fósforo (P) e molibdênio (Mo), que desempenham papel crucial no desenvolvimento saudável de plantas (Ferreira et al., 2019; Kalkhoran et al., 2021; Da Costa et al., 2016). Dessa forma, por diversos fatores e pelos comprovados efeitos de aumento de produtividade, a calagem é a prática mais comum e eficaz para reduzir a acidez do solo no Brasil (Castro e Crusciol 2015; Fonseca et al. 2009).

No entanto, sabe-se que os efeitos da calagem são superficiais (Rampim et al. 2011). Isso ocorre devido à baixa solubilidade do calcário e dos subprodutos da sua reação no solo (Rampim et al. 2011). Assim, em subsolos ácidos, com baixo conteúdo de Ca^{2+} e alto teor de Al^{3+} , mesmo com a aplicação de calcário, o crescimento do sistema radicular é limitado e, a absorção de água e nutrientes pode ser comprometida (Paradelo et al., 2015). Nesse contexto, surge o gesso agrícola, subproduto dos fertilizantes fosfatados ou associados a rochas calcárias ou evaporitas, constituídos basicamente por cálcio (Ca), e enxofre (S), que também apresenta componentes que potencializam a neutralização da acidez potencial do solo, porém, age principalmente nas camadas mais profundas do solo (Crusciol et al. 2016; Deus et al. 2014).

O gesso pode ser aplicado no solo em complemento ao calcário, pois ambos podem proporcionar Ca, Mg e aumento da saturação por bases, neutralizando os efeitos tóxicos do alumínio (Al^{3+}) e manganês (Mn), além de melhorar as propriedades físicas e biológicas do solo (Deus et al. 2014; Hontoria et al. 2018; Pedreño et al. 2018). Esse produto tem sido utilizado para solucionar problemas de toxidez por alumínio em camadas subsuperficiais, pois quando aplicado ao solo reage com o Al^{3+} , precipitando-o (Zambrosi et al. 2007) e fazendo com que ele fique em formas menos tóxicas (AlSO_4), além disso, o gesso aumenta os teores de Ca^{2+} e S no subsolo (Neis et al. 2010). Sua ação é maior nas camadas mais profundas em comparação a do calcário, devido o gesso se movimentar cerca de 150 vezes mais no solo (Maschietto 2009).

Características da área de estudo

O experimento foi conduzido na fazenda reunidas Sococo ($1^{\circ}13'42''$ S e $48^{\circ}02'57''$ W) no município de Santa Izabel do Pará. As mudas da variedade anão verde foram transplantadas para o campo experimental em fevereiro de 2020, plantadas com o espaçamento de 7,5 x 7,5 x 7,5 metros, formando um triângulo equilátero. O experimento foi composto por 7 tratamentos e 4 repetições, perfazendo 28 parcelas experimentais e cada parcela é composta por 25 plantas (Figura 1).

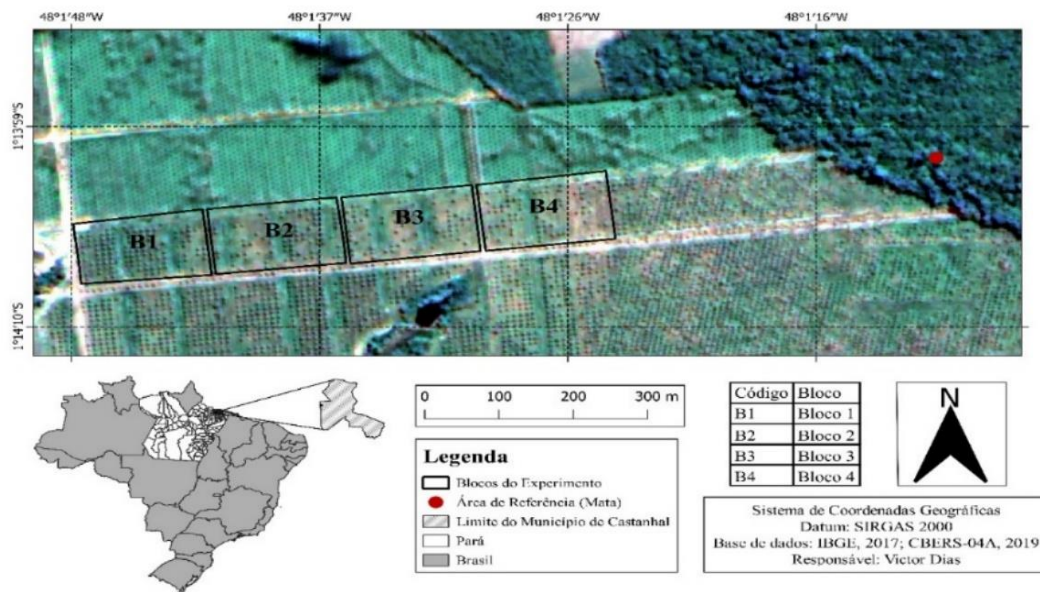


Figura 1: Mapa referente à área experimental

O experimento foi conduzido em delineamento experimental blocos inteiramente casualizados (BIC), com 4 blocos experimentais. Os tratamentos consistiram em doses combinadas de gesso e calcário, aplicados a lanço, sendo eles: T1 = controle; T2 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário; T3 = 500 kg ha⁻¹ de gesso; T4 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário e + 300 kg ha⁻¹ de gesso; T5 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 500 kg ha⁻¹ gesso; T6 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 700 kg ha⁻¹ gesso; T7 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 1000 kg ha⁻¹ gesso. As doses de gesso foram calculadas em relação à necessidade de calagem (2000 kg ha⁻¹). Os tratamentos foram aplicados em novembro de 2021, 19 meses após a implantação. As fontes de gesso e calcário utilizadas foram calcário dolomítico: (CaO: 36%; PRNT: 91%) e gesso: (Ca: 16%; S: 15%). A adubação com NPK (10-07-10) foi aplicada uma vez no ano de 2021, na concentração de 0,5 kg por planta. O pomar não recebeu nenhum tipo de irrigação específica, contando apenas com as chuvas.

Hipótese e objetivo

Neste contexto, a hipótese geral do estudo é que a aplicação de gesso agrícola associada à calagem superficial em plantio de coqueiro cultivado em solo arenoso possibilita uma maior eficiência em minimizar a acidez do solo, reduzir o efeito tóxico do Al e depositar nutrientes nas camadas subsuperficiais do solo, desse modo, será permitido maior desenvolvimento do sistema radicular em profundidade, maior eficiência na absorção de nutrientes e, consequentemente, melhor desenvolvimento da parte aérea das plantas.

Partindo dessa hipótese, objetiva-se com este estudo avaliar os efeitos da ação conjunta do calcário e gesso agrícola sobre os atributos químicos e biológicos do solo e sobre o desenvolvimento vegetativo e nutricional de plantas de coqueiro anão verde cultivadas no estado do Pará.

Esta tese foi dividida em três capítulos:

Capítulo I - Aplicação de gesso e calcário melhoram a fertilidade do solo sob cultivo de coco na Amazônia oriental, Brasil.

Neste capítulo são abordadas as alterações químicas do solo e a resposta nutricional e biométrica do coqueiro à diferentes doses de calcário e de gesso agrícola aplicados em superfície. O manuscrito “*Gypsum and lime applications improve soil fertility under coconut cultivation in Eastern Amazon, Brazil*” foi publicado na revista Ciência e Agrotecnologia, em maio de 2024, vol.48. DOI: 10.1590/1413-7054202448017423. Os autores colaboradores foram: Maynara Santos Gomes; Suzana Romeiro Araújo; Mário Lopes da Silva Júnior; Paulo Manoel Pontes Lins; Ana Renata Abreu de Moraes e Mila Façanha Gomes.

Capítulo II – Gesso agrícola combinado com calcário para saúde química de um Neossolo Quartzarênico: uma abordagem multivariada.

Neste capítulo é avaliado o índice de qualidade de um Neossolo Quartzarênico sob aplicação de gesso e calcário.

Capítulo III – Dinâmica do carbono no solo em cultivo de coqueiro anão verde sob aplicação de calcário e gesso na Amazônia oriental.

Neste capítulo é realizado a análise temporal a curto prazo (16 meses) da dinâmica do carbono em Neossolo Quartzarênico submetido aplicação a lanço de gesso e calcário e cultivado com plantas jovens de coqueiro anão verde.

REFERÊNCIAS

- Akpro, L. A. et al. Phytochemical compounds, antioxidant activity and non-enzymatic browning of sugars extracted from the water of immature coconut (*Cocos nucifera* L.). *Scientific African*, v. 6, p. e00123, 2019.
- Alves, K. D. N. A et al. Estudo da evolução do cultivo de coco em municípios do estado do Pará e nos principais estados brasileiros produtores. *Revista Agroecossistemas*, 10 (2), 209-224, 2018.
- Baptistella, C. S. L.; Coelho, P. J. Cocoicultura no Estado de São Paulo, 2015 a 2020. *Análises e Indicadores do Agronegócio*, São Paulo, v. 16, n. 11, p. 1-6, nov. 2021.

- Benassi, A. C.; Fanton, C. J.; Santana, E. N. De. O cultivo do coqueiro-anão-verde. 1º ed. Vitória: Incaper, 2013.
- Benassi, A.C., Fanton, C.J. & Santana, E.N. (2013). O cultivo do coqueiro- anão-verde: tecnologias de produção (120 p.). Vitória, ES: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural.
- Brainer, M. S. C. P. Coco: Produção E Mercado. Caderno Setorial ETENE. Ano 6, n. 206, dez 2021. Disponível em:. Acesso em: 21 de março.de 2023.
- Cabot, C.; Martos, S.; Llugany, M.; Gallego, B.; Tolrá, R.; Poschenrieder, C. A role for zinc in plant defense against pathogens and herbivores. **Frontiers in plant Science**. v. 10, p. 181-190, 2019.
- Carducci, C. E.; Oliveira, G. C.; Curi, N.; Heck, R. J.; Rossono, D. F.; Carvalho, T. S.; Costa, A. L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil and Tillage Research*, v. 145, p. 171-180, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.015>.
- Carneiro, M. A. C.; Souza, E. D.; Reis, E. F.; 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, n. 1 p.147-157, 2009.
- Castro, G. S. A., And C. A. C. Crusciol. 2015. Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in rotation with green manure in a tropical region. *Bragantia* 74 (3):311–21. doi:10.1590/1678-4499.0346.
- Castro, G. S. A.; Crusciol, C. A. C. Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in rotation with green manure in a tropical region. *Bragantia*, v.74, n.3, p.311-321, 2015. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0346>
- Cintra, F. L. D. (Ed.). Cultura do coqueiro. Dados sistema de produção. Embrapa Tabuleiros Costeiros. 2016.
- Comério, E. F.; Onody, H. C.; Benassi, V. L. R. M. Levantamento da Fauna de Ichneumonidae (Hymenoptera) em Cultivo de Coqueiro Anão Verde associado às plantas invasoras. *EntomoBrasilis*, Vassouras-RJ, v. 5, n. 2, p. 109-114, 2012.
- Crusciol, C. A., R. R. Marques, A. C. Carmeis Filho, R. P. Soratto, C. H. Costa, J. F. Neto, G. S. A. Castro, C. M. Pariz, A. M. Castilhos, and A. J. Franzluebbbers. 2019. Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 115 (3):347–72. doi:10.1007/s10705-019-100170.
- Dalla Nora, D. D. et al. Gesso: alternativa para redistribuir verticalmente nutrientes no perfil do solo sob sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, v. 133, n. 1, p. 8-20, 2013.
- Deus, A. C. F., L. T. Bull, J. C. Corrêa, And R. L. Villas Boas. 2014. Nutrient accumulation and biomass production of alfalfa after soil amendment with silicates. *Revista Ceres* 61

(3):406–13. doi:10.1590/S0034-737X2014000300016.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Água de coco: Métodos de Conservação.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/422074/1/Dc037.pdf>.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2006. 306 p.

FAO. FAOSTAT. 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>> Acesso em: 10 ago. 2021.

Ferreira, T.R.; Pires, L.F.; Wildenschild, D.; Brinatti, A.M.; Borges, J.A.; Auler, A.; Dos Reis, A.M.H. Lime application effects on soil aggregate properties: Use of the mean weight diameter and synchrotron-based X-ray _CT techniques. *Geoderma* 338. 585–596, 2019.

Ferreira, J. M. S.; Warwick, D.R.N.; Siqueira, L.A (eds.). A cultura do coqueiro no Brasil. Aracaju: EMBRAPA - SPI, 2018. 508p.

Fonseca, I. M., R. D. M. Prado, A. D. A. Vidal, And T. A. R. Nogueira. 2009. Effect of slag, lime and nitrogen in silicon absorption and production.

Fontes, H. R.; Ferreira, J. M. S.; Siqueira, L. A. Sistema de Produção para a Cultura do Coqueiro. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, p. 63, 2002.

Frazão, L. A.; Piccolo, M. C.; Feigl, B. J. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-Grossense. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília-DF, v. 43, n. 5, p. 641-648, 2008.

Gunn, B. F.; Baudouin, L.; Olsen, K. M. Independent origins of cultivated coconut (*Cocos nucifera* L.) in the old world tropics. *PLoS ONE*, v. 6, n. 6, 2011.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA, 2020 Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

IBGE. Sistema IBGE Produção grícola- Lavoura permanente. 2022 Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/moju/pesquisa/15/11863?indicador=11929>> Acesso em: 18 abr. 2024.

Kalkhoran, S.S.; Pannell, D.; Polyakov, M.; White, B.; Haghghi, M.C.; Muger, A.W.; Farre, I. A dynamic model of optimal lime application for wheat production in Australia. *Aust. J. Agric. Resour. Econ.*, 65, 472–490, **2021**.

Lacerda, M. S.; Leitão, F. O coco verde no contexto da economia circular: uma revisão sistemática da literatura. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 3, p. 1-16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n3e8092>. Acesso em: 16 abr. 2024.

- Li, Y.; Cui, S.; Chang, S.X.; Zhang, Q. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: A global meta-analysis. *J. Soils Sediments* **2019**, *19*, 1393–1406.
- Lins, P. M. P. & Viégas, I. J. M. Adubação do coqueiro no Pará. Belém-PA: Embrapa Amazônia Oriental, 28 p., 2008.
- Lins, P. M. P.; Viegas, I. J. M.; F. E. V. O. Nutrition and production of coconut palm cultivated with mineral fertilization in the state of Pará. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 2020.
- Liyanage, D.V. (1958) Varieties and forms of the coconut palm grown in Ceylon. *Ceylon Coconut Quarterly* *9*: 1–10.
- Mahmud, M.S.; Chong, K.P. Effects of Liming on Soil Properties and Its Roles in Increasing the Productivity and Profitability of the Oil Palm Industry in Malaysia. *Agriculture* **2022**, *12*, 322. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030322>.
- Marino Ya, Toledo Fhsf, Ferraz A, Goncalves Jlm, Diaz S, Barrero C, Sierra A, Bolognani H (2020) Soil fertility and fine root distribution after gypsum application in *Eucalyptus* plantations with different tolerance to water deficit. *New for* *51*:1039–1054. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09773-7>.
- Maschietto, E. H. G. Gesso agrícola na produção de milho e soja em solo de alta fertilidade e baixa acidez em subsuperfície em plantio direto. 2009. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2009.
- Mattiello, L.; Kirst, M.; Silva, F. R.; Jorge, R. A.; Menossi, M. Transcriptional profile of maize roots under acid soil growth. *BMC Plant Biology*, v. 10, p. 196–110, 2010.
- Medeiros, S. W. T, et al. Levantamento da textura do solo e da relação silte/argila em regiões semiáridas do Nordeste. *Agropecuária científica no semiárido*, v. 14, n. 4, p. 266-272, 2019.
- Meurer, E. J.; Rhenheimer, D.; Bissani, C. A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, J. E. (Ed.). *Fundamentos de química do solo*. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p. 131-179.
- Moline, E. F. V. & Coutinho, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 58, n. 1, p. 14-20, 2015.
- Neis, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, v. 34, n. 2, p. 409-416, 2010.
- Nucé De Lamothe, M. *Melhoramento do Coqueiro*. Montpellier: IRHO, 1983. Relatório da Missão Realizada nas plantações de Embrapa.
- Oduro-Yeboah, C. et al. Food safety knowledge and practices among fresh coconut vendors. *Scientific African*, v. 8, 2020.

- Oliveira, E. L. De. Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no estado do Paraná. Londrina-PR: Instituto Agrônômico do Paraná, 2013.
- Paradelo, R.; Virto, I.; Chenu, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 202, 98–107, 2015.
- Rampim, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, 2011
- Rocha, K. D. C.; Ferreira, M. S.; Garcia, C. E. R. Produção e produtos à base de coco (*Cocos nucifera* L.): uma revisão. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.8, n.5, p. 41476-41491, may., 2022. DOI:10.34117/bjdv8n5-573.
- Rocha, K. D. C.; Ferreira, M. S.; Garcia, C. E. R. Óleo de Coco: características e aplicações fisiológicas. In: NORA, F. M. D. (ed). **Compostos Bioativos**. Canoas: Mérida Publishers, 2021. DOI: 10.4322/mp.978-65-994457-7-4.c8.
- Sanábio, D.; Farias, D. Da. H. Recomendações técnicas para a cultura do coqueiro. Emater-MG, 2024.
- Silva, M. S. L. Da; Oliveira Neto, M. B. De. Solos tropicais, Neossolo- quartizarenico, Brasília, DF: Embrapa Solos, 2021. 41p.
- Sisunandar Ra, Turquay P, Samosir Y, Adkins Sw (2010) Cryopreservation of coconut (*Cocos nucifera* L.) zygotic embryos does not induce morphological, cytological or molecular changes.
- Snider, J. Et Al. Cotton physiological and agronomic response to nitrogen application rate. *Field Crops Research*, 270: 1-9, 2021.
- Teixeira, L. A. J.; Bataglia, O. C.; Buzetti, S.; Furlani Junior, E.; Isepon, J. dos S. NPK fertiliation on dwarf green coconut (*Cocos nucifera* L.) – yield and fruit quality. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, p.120-123, 2005.
- Wadt, P. G. S.; Saldanha, E. C. M.; Silva Junior, M. L.; Lins, P. M. P. Recomendação de Calagem e Adubação na Cultura do Coqueiro (*Cocos nucifera*) na Amazônia. 2021.
- Wijebandara, D. M. D. I.; Vidhanaarachchi, V. R. M.; Gunathilaka, T. R.; Tennakoon, N. A. Effect of Copper and Zinc on Embryo Germination and Seedling Growth of Coconut (*Cocos nucifera* L.). **Fifth Symposium on Plantation Crop Research**, Sri Lanka. 2014.
- Zambrosi, F .C. B.; Alleoni, L. R. F.; Caires, E. F. Aplicação De Gesso Agrícola E Especificação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 110-117, 2007.
- Davis , K. F.; HI Koo , J. Dell'Angelo , P. D'Odorico , L. Estes, LJ Kehoe , M. Tatlhago Perda de florestas tropicais é agravada por aquisições de terras em larga escala *Geociências Nacionais* , 13 (7) (2020) , pp. 482 - 488 , [10.1038/s41561-020-0592-3](https://doi.org/10.1038/s41561-020-0592-3).

- Araújo, E.A.D.; Ker, J.C.; Neves, J. C. L.; Lani, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, Guarapuava*, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.
- Rousseau, L.; Fonte, S.J.; Téllez, O.; Hoek, R. Van Der.; Lavelle, P. Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua. *Ecological Indicators, Amsterdam*, v. 27, p. 71-82, 2013.
- Ferraz, R. P. D.; Kuchler, P. C.; Simões, M.; A Intensificação do uso agrícola do solo: Uma trajetória para o desenvolvimento sustentável da agricultura brasileira. In: COSTA, A. J. S. T. da; LIMA, C. S. (org.). *Natureza e sociedade: perspectivas de ação e análise*. Curitiba: Bagai, 2021. cap. 17, p. 236-248.
- Zhang S, Yang W, Muneer MA, Ji Z, Tong L, Zhang X *et al.*, Integrated use of lime with Mg fertilizer significantly improves the pomelo yield, quality, economic returns and soil physicochemical properties under acidic soil of southern China. *Sci Horti* **209**:110502 (2021).
- Vezzani, F. M.; Ferreira, G. W.; Souza, M.; Comin, J. J. Conceitos, métodos de avaliação participativa e o SPDH como promotor de qualidade do solo. In: FAYAD, J. A.; ARL, V.; COMIN, J. J.; MAFRA, A. L.; MARCHESI, D. R. *Sistema de Plantio Direto de Hortaliças*. Florianópolis, Epiagri, 2019. 428p.
- Karlen, D.L.; Mausbach, M.J.; Doran, J.W.; Cline, R.G.; Harris, R.F.; Schuman, G.E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, v.61, n.1, p.4-10, 1997.
- Aragão, W. M.; Ramos, R. S. R.; Alves, M. C. S. Cultivares de coqueio. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Sistema de Produção. Versão Eletrônica 2ª edição | Aug/2016.
- Cappelli, S.L., Domeignoz-Horta, L.A., Loaiza, V., & Laine, A-L. (2022). Plant biodiversity promotes sustainable agriculture directly and via belowground effects. *Trends in Plant Science*, 27, 674-687.
- Suzuki, L. E. A. S., Lima, C. L. R. de, Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Pillon, C. N. (2012). Condição estrutural de um argissolo no Rio Grande do Sul, em floresta nativa, em pastagem cultivada e em povoamento com eucalipto. *Ciência Florestal*, 22(4), 833–843.

CAPÍTULO 1: APLICAÇÕES DE GESSO E CALCÁRIO MELHORAM A FERTILIDADE DO SOLO SOB CULTIVO DE COCO NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL

Resumo: A aplicação de gesso e calcário resulta em modificações químicas no solo que influenciam no teor de nutrientes, crescimento radicular e desenvolvimento das plantas. Com o objetivo de avaliar as alterações químicas do solo e respostas do coqueiro anão verde ao gesso e calcário no período de 6 e 12 meses após aplicação, foi realizado experimento no município de Santa Isabel no estado do Pará. O delineamento experimental foi em blocos inteiramente casualizados, sendo 4 blocos e 7 tratamentos: T1 = controle; T2 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário; T3 = 500 kg ha⁻¹ de gesso; T4 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 300 kg ha⁻¹ de gesso; T5 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 500 kg ha⁻¹ gesso; T6 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 700 kg ha⁻¹ gesso; T7 = 2000 kg ha⁻¹ calcário e 1000 kg ha⁻¹ gesso. Após 12 meses da aplicação dos tratamentos, a combinação de gesso e calcário resultou na redução da saturação por alumínio, com valores de 0% na profundidade de 00 - 10 cm do solo, bem como promoveu o incremento de teores de enxofre e aumento da saturação por bases do solo, com valores de 70% na profundidade de 0,0- 10 cm do solo; apresentou efeitos positivos na concentração de macronutrientes no tecido foliar e no crescimento radicular. A aplicação de gesso agrícola, associada ao calcário mostrou-se eficiente para melhorar os atributos químicos do solo e o desenvolvimento das plantas de coqueiro anão verde.

Palavras-Chave: Calagem, sulfato de cálcio, nutrição de plantas, *cocos nucifera*

Abstract: Gypsum and lime application causes chemical modifications in the soil that influence nutrient content, root growth and development of plants. An experiment was carried out in the municipality of Santa Isabel, Pará state, Brazil, to evaluate the chemical changes in the soil and the responses of green dwarf coconut to gypsum and lime at 6 and 12 months after application. The experimental design was completely randomized blocks, with 4 blocks and 7 treatments: T1 = control; T2 = 2000 kg ha⁻¹ of lime; T3 = 500 kg ha⁻¹ of gypsum; T4 = 2000 kg ha⁻¹ of lime + 300 kg ha⁻¹ of gypsum; T5 = 2000 kg ha⁻¹ of lime + 500 kg ha⁻¹ of gypsum; T6 = 2000 kg ha⁻¹ of lime + 700 kg ha⁻¹ of gypsum; T7 = 2000 kg ha⁻¹ of lime and 1000 kg ha⁻¹ of gypsum. After 12 months of applying the treatments, the combination of gypsum and limestone was used to reduce aluminum saturation, with values of 0% at a depth of 0.0-10 cm of the soil, as well as increments in sulfur contents and base saturation of the soil, with values of 70% at a depth of 0.0-10 cm of the soil; with positive effects on macronutrients concentrations in leaf tissue and on root growth. Application of agricultural gypsum, associated with lime, is efficient to improve the chemical attributes of the soil and the development of green dwarf coconut plants.

Key words: Liming, calcium sulfate, plant nutrition, *cocos nucifera*

INTRODUÇÃO

O cultivo de coqueiro (*Cocos nucifera* L.) apresenta grande destaque no mercado agrícola brasileiro (Fróes Júnior et al., 2019). No Brasil são 187,5 mil hectares plantados com coqueiros, que respondem por 1,6 bilhão de frutos (Faostat, 2021), com destaque para a região Norte, que ocupa a terceira posição em termos de produção (IBGE, 2021). Nesta região os coqueirais geralmente são cultivados em solos ácidos e com baixa fertilidade natural, como é o caso dos Neossolos Quartzarênicos. Dessa forma, o crescimento e o aumento da produtividade ficam condicionados à aplicação de grandes quantidades de fertilizantes minerais e à correção da acidez do solo (Silva et al., 2019).

A principal técnica utilizada para melhorar a qualidade de solos ácidos e com baixa fertilidade é o uso de calcário (Costa et al., 2015), já sendo utilizado de forma isolada nos cultivos de coqueiro no estado do Pará (Brasil et al., 2020). O calcário aplicado no solo disponibiliza nutrientes, neutraliza o pH e reduz o potencial tóxico do alumínio (Costa et al., 2015). Contudo, esses efeitos se limitam às camadas superficiais (Nolla et al., 2020).

De acordo com Tiecher et al. (2017), a toxicidade do alumínio nas camadas mais profundas do solo pode ser reduzida com corretivos de maior solubilidade, como o gesso agrícola, que promove a redução da saturação do alumínio ao formar moléculas entre S e Al (AlSO₄⁺) menos tóxicas às plantas. Além disso, o uso do gesso aumenta a solubilidade de Ca e Mg e consequentemente aumenta esses nutrientes nas camadas mais profundas do solo.

Efeitos da aplicação do gesso e calcário são amplamente conhecidos na literatura (Costa, 2020; Macana, 2023; Crusciol, 2019). Sabe-se que Neossolos Quartzarênicos são predominantemente arenosos, com baixa retenção de água e nutrientes (Brasil et al., 2020) e, considerando a escassez de informações sobre o cultivo de coqueiro no estado do Pará, torna-se imperativo conduzir estudos que demonstrem se o uso de gesso associado ao calcário é capaz de alterar a fertilidade desse tipo de solo e causar mudanças no crescimento e no estado nutricional de plantas de coqueiro. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito do gesso e do calcário aplicados de forma isolada e conjunta, com diferentes tempos de reação no solo, nas propriedades químicas do solo, no crescimento e na resposta nutricional de plantas de coqueiro anão verde, cultivadas no estado do Pará.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na fazenda reunidas Sococo (1°13'42" S e 48°02'57" W) no município de Santa Izabel do Pará. O experimento foi implantado em fevereiro de 2020. As mudas da variedade coco anão verde do Brasil foram plantadas com o espaçamento de 7,5

x 7,5 x 7,5 metros, formando um triângulo equilátero. O experimento foi composto por 7 tratamentos e 4 repetições, perfazendo 28 parcelas experimentais e cada parcela é composta por 25 plantas.

O clima da região é tropical úmido do tipo Am segundo a classificação de Köppen e Geiger, com temperatura média mensal de 25°C. Durante o período experimental foram registradas precipitações anuais e temperaturas mínimas e máximas (de 21,9 a 32,9°C) no local, mostradas na Figura 1.

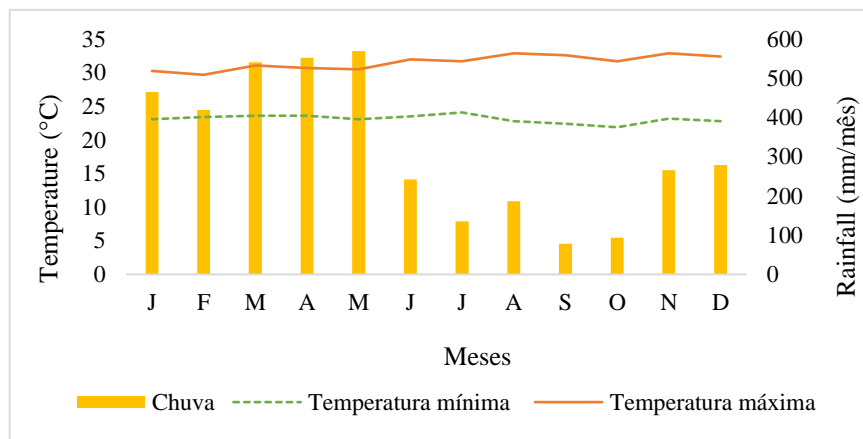


Figura1: Precipitação mensal e temperaturas máximas e mínimas durante o período experimental

O solo da área do experimento foi caracterizado como Neossolo Quartzarênico distrófico (Santos et al., 2018). Para caracterização da área antes da aplicação dos tratamentos foram coletadas amostras de solos em seis profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm) que apresentaram características químicas e granulométricas demonstradas na Tabela 1. A preparação das amostras e as análises químicas foram realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017).

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico antes da instalação do experimento, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm

PROF	pH (CaCl ₂)	pH (SMP)	M O	C. Org	S	P	K	Ca	Mg	Al	CTC	V%	m%
			-----mg dm ⁻³ -----				-----mmolc dm ⁻³ -----						
0-5	4,2	6,1	18,5	10,8	7,8	4,0	0,4	6,8	2,0	5,8	4,95	19,3	38,5
5-10	4,1	6,0	16,8	9,8	6,3	3,3	0,3	5,5	1,8	7,3	4,91	16,0	48,2
10-20	4,2	6,1	15,0	8,8	7,3	4,1	0,2	4,8	1,8	7,0	4,58	15,0	50,3
20-40	4,3	6,2	9,0	5,3	9,0	1,6	0,1	3,0	1,0	8,0	3,98	10,8	64,9
40-60	4,3	6,2	6,3	3,3	12,5	1,5	0,1	3,0	1,0	7,0	3,73	11,5	60,9
60-80	4,4	6,5	4,3	2,3	15,0	0,9	0,2	3,3	1,3	5,8	3,06	15,8	54,7

PROF	B	Cu	Fe	Mn	Zn	PROF	Areia	Silte	Argila
			-----mg dm ⁻³ -----			-----g kg ⁻¹ -----			
0-5	0,3	0,3	153,8	8,4	1,6	0-5	829	78	93
5-10	0,2	0,2	183,8	6,1	1,0	5-10	842	77	81
10-20	0,3	0,3	228,8	5,1	0,8	10-20	828	96	76
20-40	0,2	0,2	286,3	2,3	0,1	20-40	803	136	61
40-60	0,1	0,1	292,5	1,4	0,1	40-60	798	115	87
60-80	0,1	0,2	278,8	1,8	0,1	60-80	757	111	132

P, Mn, Fe, Cu, Zn – Extrator Mehlich 1; Ca, Mg, K – Extrator Resina; B – Método água quente.

O experimento foi conduzido em delineamento experimental em blocos inteiramente casualizados (BIC) com 4 blocos experimentais. Os tratamentos consistiram em doses combinadas de gesso e calcário aplicados a lanço, sendo eles: T1= controle; T2 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário; T3 = 500 kg ha⁻¹ de gesso; T4 = 2000 kg ha⁻¹ de calcário e + 300 kg ha⁻¹ de gesso; T5 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 500 kg ha⁻¹ gesso; T6 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 700 kg ha⁻¹ gesso; T7 = 2000 kg ha⁻¹ calcário + 1000 kg ha⁻¹ gesso. As doses de gesso foram calculadas em relação à necessidade de calagem (2000 kg ha⁻¹). Os tratamentos foram aplicados em novembro de 2021, 19 meses após a implantação. As fontes de gesso e calcário utilizadas foram Calcário Dolomítico: (CaO: 36%; PRNT: 91%) e gesso: (Ca: 16%; S: 15%). A adubação de fundação consistiu na aplicação de 0,3 kg por cova de superfosfato simples (SFS), e no ano de 2021 foi realizada adubação com NPK (10-07-10), na concentração de 0,5 kg por planta. O pomar não recebeu nenhum tipo de irrigação específica, contando apenas com as chuvas.

Os efeitos dos tratamentos foram analisados no período de 6 meses e 12 meses após a aplicação dos tratamentos. Para análise de fertilidade do solo foram coletadas 168 amostras em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm). As amostras de solo foram secas ao ar peneiradas em malha de 2 mm. As análises realizadas foram potencial hidrogeniônico (pH), acidez potencial (H+Al), íon cálcio (Ca⁺²), íon magnésio (Mg⁺²), íon alumínio (Al⁺³), íon potássio (K⁺), fósforo disponível (P), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), e carbono orgânico (COrg) (Teixeira et al. 2017). Após os resultados

calculou-se a capacidade de troca de cátions (CTC); saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%).

O material para análise de tecido foliar foi coletado conforme os procedimentos seguidos por Martin-Prével (1984), que recomenda a coleta dos folíolos centrais da folha número 4 para plantas com até três anos de idade. Assim, foram coletados três folíolos de cada lado da parte central da folha de 16 plantas de cada tratamento, totalizando 112 amostras. Após a coleta, o material foi seco em estufa a 60°C até atingir peso constante, em seguida, foi triturado em moinho do tipo Willey (modelo MA 340, Marconi, BR).

O estado nutricional das plantas foi avaliado por meio da concentração de macro e micronutrientes no tecido foliar. Os macronutrientes avaliados foram: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg); e micronutrientes: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). As análises foram realizadas de acordo com Embrapa (2000).

Com a finalidade de observar o crescimento e desenvolvimento radicular de plantas de coqueiro, empregou-se o método do rizotron (rizo=raiz tron=janela), sendo essa uma análise não destrutiva (Metcalf, 2008). Foram instalados em um bloco, 14 rizotrons de formato retangular com altura de 105 cm e largura de 75 cm. As paredes dos rizotrons são de acrílico transparente (7,0 mm) com bordas de madeira; as mensurações foram realizadas por meio de perfil gradeado medindo 10 x 10 cm cada gradil com auxílio de fita métrica graduada.

As análises estatísticas foram executadas usando o software R versão 4.2.0. Foram realizadas análises de regressão (linear e quadrática) para avaliar os parâmetros de crescimento (parte aérea e raízes), de nutrição e do solo; as equações foram escolhidas com base na significância dos coeficientes. Os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade foram verificados por meio dos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Para todas as análises, foi utilizada a função `dbc` do pacote `ExpDes.pt`.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeitos do gesso e do calcário nas propriedades químicas do solo

A aplicação de gesso em conjunto com calcário proporcionou mudanças significativas nas propriedades químicas do solo nos dois períodos analisados (Figura 2 e Figura 3). No primeiro período, 6 meses após a aplicação dos tratamentos, as principais alterações observadas nas camadas de 0-5 cm foram o incremento de Ca e Mg, aumento na V%, redução dos teores de H⁺Al e de alumínio Al⁺, com conseqüente redução no alumínio m% (Figura 2).

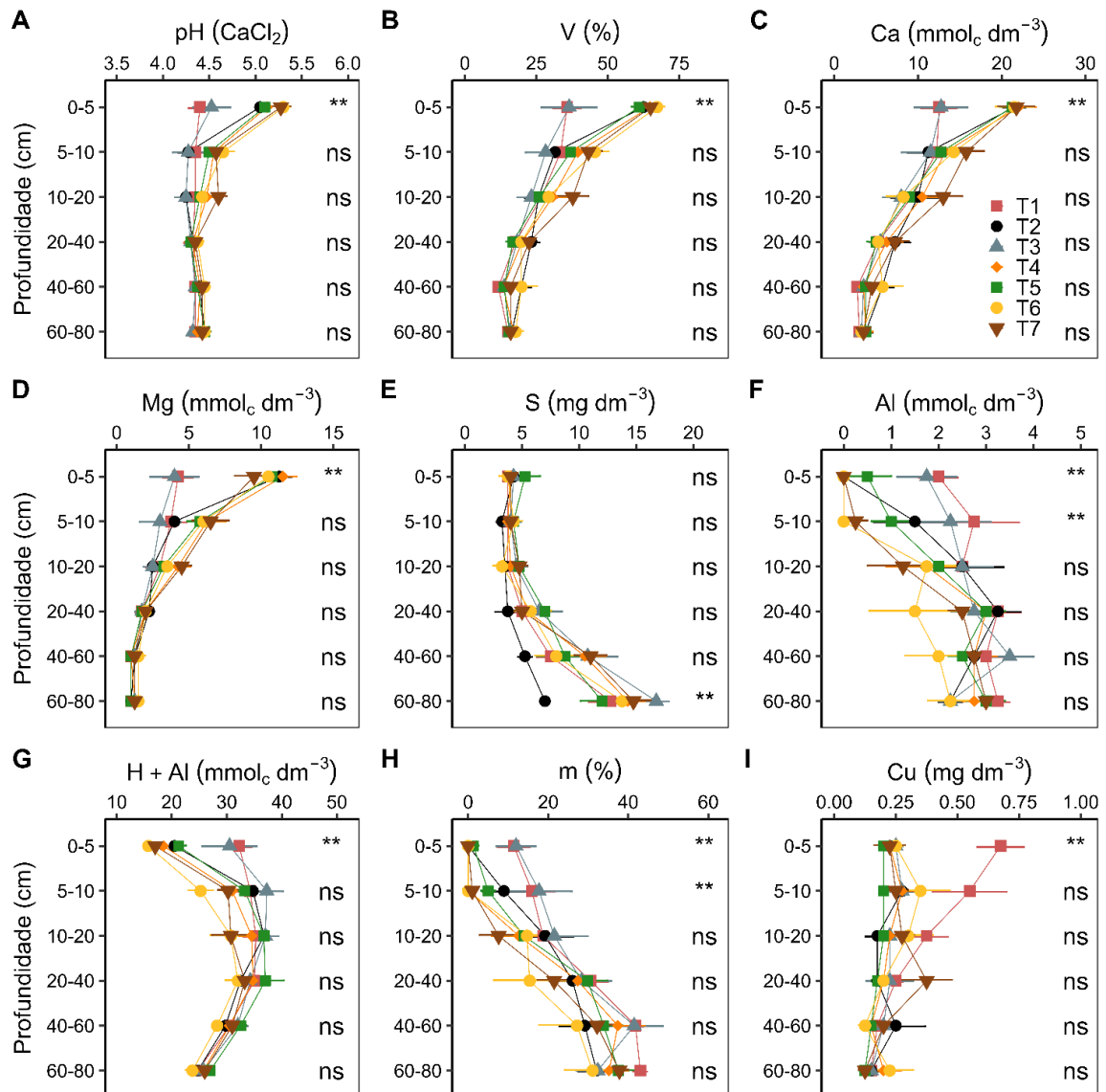


Figura 2: Influência das doses de calcário e gesso na concentração do potencial hidrogeniônico – pH (A), saturação por bases -V% (B), cálcio trocável – Ca^{+2} (C), magnésio trocável– Mg^{+2} (D), enxofre – S (E), alumínio trocável - Al^{+} (F), acidez potencial -H+Al (G), saturação por alumínio - m% (H), cobre – Cu (I), no solo 6 meses após aplicação dos tratamentos. * - significativo a $p \leq 0,05$, ** - significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; R^2 – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ($n = 16$).

No segundo período, 12 meses após a aplicação dos tratamentos, observaram-se mais mudanças significativas dos atributos químicos do solo nos diferentes tratamentos e profundidades (Figura 3), quando comparadas ao primeiro período de avaliação (Figura 2). Os melhores resultados foram obtidos nos tratamentos que associavam gesso e calcário, tais como T4, T5 e T6 (Figura 3). Embora 12 meses seja um período curto para a total reação do gesso (Macana, 2023) e do calcário, foi possível observar incremento de Ca, Mg, K, S, CTC, V%, redução do pH, da H+Al e do Al^{+} , conseqüentemente, redução na m%. De modo geral, mudanças foram observadas até a camada de 60–80 cm (Figura 3).

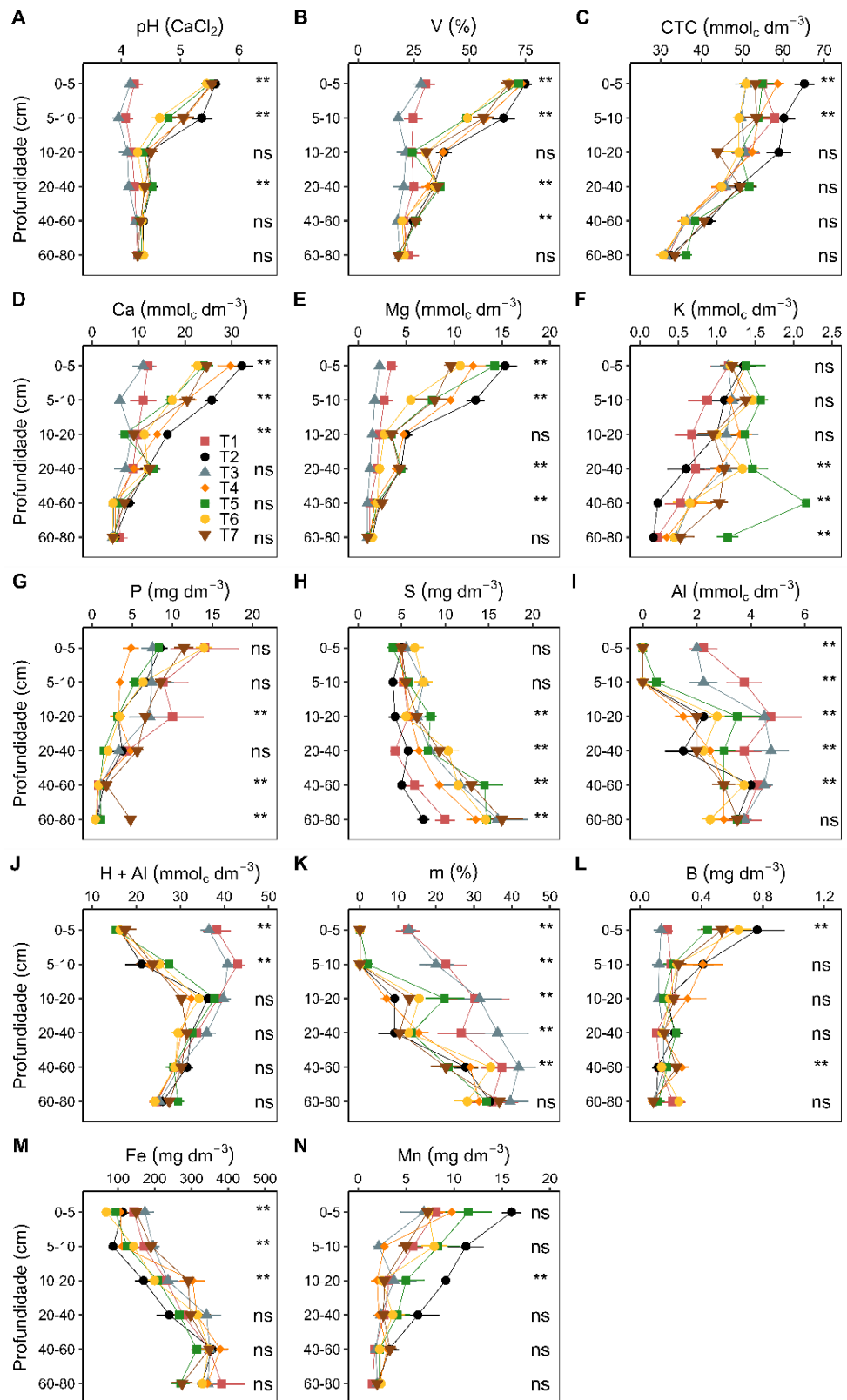


Figura 3: Influência das doses de calcário e gesso na concentração do potencial hidrogeniônico – pH (A), saturação por bases -V% (B), capacidade de troca de cátions -CTC (C), cálcio trocável – Ca^{2+} (D), Magnésio trocável– Mg^{2+} (E), potássio – K (F), fósforo disponível – P (G), enxofre – S (H), alumínio trocável - Al^+ (I), acidez potencial -H+Al (J), saturação por alumínio - m% (K), boro – B (L), ferro – Fe (M), manganês – Mn (N), no solo 12 meses após aplicação dos tratamentos. * - significativo a $p \leq 0,05$, ** - significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; R^2 – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 16)

Os resultados observados para as propriedades químicas do solo em função das doses de calcário e gesso são mostrados nas tabelas 2 e 3. As variáveis que não sofreram efeitos significativos de acordo com a análise de regressão nos períodos de 6 meses (K, P, S, CTC, Corg, CaCl₂, B, Fe, Mn, Zn e Na) e 12 meses (Corg, Cu, Zn e Na) não serão mostradas neste estudo.

Tabela 2: Equações de regressão com coeficientes de determinação significativos ($p \leq 0,01$) entre cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Saturação por bases (V%), Acidez total (H+Al), Alumínio trocável (Al⁺), Saturação por bases (m%), Cobre (Cu) e enxofre (S) no solo (\hat{y}), para diferentes profundidades, e doses de gesso e calcário (X), aplicados em superfície do solo, no período de 6 meses após aplicação dos tratamentos.

\hat{y}	Profundidade (cm)	Equação	R ²
Ca	0-5	$\hat{y} = 13,85 + 1,29x$	0,41
Mg	0-5	$\hat{y} = 2,75 + 2,79x - 2,25x^2$	0,33
V%	0-5	$\hat{y} = 38,91 + 0,34x$	0,46
H+Al	0-5	$\hat{y} = 31,46 - 2,30x$	0,58
Al	0-5	$\hat{y} = 1,64 - 0,26x$	0,39
	5-10	$\hat{y} = 2,78 - 0,41x$	0,67
m%	0-5	$\hat{y} = 9,93 - 1,60x$	0,38
	5-10	$\hat{y} = 17,67 - 268x$	0,6
Cu	0-5	$\hat{y} = 0,80 - 26x + 0,26x^2$	0,72
S	60-80	$\hat{y} = 10,93 + 0,53x$	0,13

Tabela 3: Equações de regressão com coeficientes de determinação significativos ($p \leq 0,01$) potencial hidrogeniônico (pH CaCl₂), potássio (K), cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Acidez total (H+Al), Alumínio trocável (Al+), capacidade de troca de cátions (CTC), Saturação por bases (V%), Saturação por bases (m%), enxofre (S), boro (B), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e fósforo (P) no solo (\hat{y}), para diferentes profundidades, e doses de gesso e calcário (X), aplicados em superfície do solo, no período de 12 meses após aplicação dos tratamentos.

\hat{y}	Profundidade (cm)	Equação	R ²
pH CaCl ₂	0-5	$\hat{y} = 0,409 + 0,402x - 0,0281x^2$	0,36
pH CaCl ₂	5-10	$\hat{y} = 4,3 + 0,008x$	0,11
pH CaCl ₂	20-40	$\hat{y} = 4,2 + 0,024x$	0,12
K	20-40	$\hat{y} = 0,63 + 0,10x$	0,53
K	40-60	$\hat{y} = -0,19 + 0,46x - 0,041x^2$	0,28
K	60-80	$\hat{y} = -0,18 + 0,31x - 0,029x^2$	0,38
Ca	0-5	$\hat{y} = 11,96 + 5,016x - 0,484x^2$	0,14
Ca	5-10	$\hat{y} = 13,61 + 0,80x$	0,07
Ca	10-20	$\hat{y} = 12,78 - 0,49x$	0,1
Mg	0-5	$\hat{y} = 2,121 + 3,768x - 0,376x^2$	0,18
Mg	5-10	$\hat{y} = 5,62 + 0,294$	0,09
Mg	20-40	$\hat{y} = 2,44 + 0,20x$	0,1
Mg	40-60	$\hat{y} = 1,21 + 0,15x$	0,37
H+Al	0-5	$\hat{y} = 42,77 - 8,711x + 0,717x^2$	0,45
H+Al	5-10	$\hat{y} = 43,5 - 5,77x + 0,44x^2$	0,33
Al	0-5	$\hat{y} = 2,607 - 0,8125x + 0,062x^2$	0,47
Al	5-10	$\hat{y} = 4,28 - 1,46x + 0,125x^2$	0,55
Al	10-20	$\hat{y} = 4,21 - 0,29x$	0,25
Al	20-40	$\hat{y} = 3,60 - 0,19x$	0,14
Al	40-60	$\hat{y} = 4,46 - 0,20x$	0,47
CTC	0-5	$\hat{y} = 59,857 - 1,062x$	0,2
CTC	5-10	$\hat{y} = 58,57 - 1,11x$	0,36
V%	0-5	$\hat{y} = 24,21 + 14,98x - 1,24x^2$	0,32
V%	5-10	$\hat{y} = 28,89 + 5,62x - 0,28x^2$	0,16
V%	20-40	$\hat{y} = 24,07 + 1,77x$	0,39
V%	40-60	$\hat{y} = 20,17 + 0,5x$	0,1
m%	0-5	$\hat{y} = 14,36 - 4,13x + 0,29x^2$	0,42
m%	5-10	$\hat{y} = 25,43 - 7,57x + 0,56x^2$	0,45
m%	10-20	$\hat{y} = 25,18 - 1,70x$	0,14
m%	20-40	$\hat{y} = 26,92 - 2,28x$	0,24
m%	40-60	$\hat{y} = 38 - 1,76x$	0,28
S	10-20	$\hat{y} = 5,17 + 0,25x$	0,18
S	20-40	$\hat{y} = 4,10 + 0,86x$	0,8
S	40-60	$\hat{y} = 5,19 + 1,25x$	0,61
S	60-80	$\hat{y} = 8,62 + 1,16x$	0,57
B	0-5	$\hat{y} = 0,30 + 0,04x$	0,13
B	40-60	$\hat{y} = 0,12 + 0,013x$	0,26
Fe	0-5	$\hat{y} = 143,17 - 5,41x$	0,1
Fe	5-10	$\hat{y} = 188,17 - 33,82x + 4,67x^2$	0,21
Fe	10-20	$\hat{y} = 204,53 + 7,50x + 0,11x^2$	0,11
Mn	10-20	$\hat{y} = 5,99 - 0,483x$	0,18
P	10-20	$\hat{y} = 12,85 - 4,23x + 0,46x^2$	0,56
P	40-60	$\hat{y} = 1,40 - 0,28x + 0,04x^2$	0,25
P	60-80	$\hat{y} = 2,27 - 1,41x + 0,23x^2$	0,67

O pH foi afetado significativamente pelos tratamentos nos dois períodos analisados nas camadas 0-5 cm e nas camadas de 5-10 e 20-40 cm somente 12 meses pós aplicação (Figura 3A). Pode-se inferir que a forma de aplicação a lanço de gesso e calcário no solo interferiram nos resultados, apresentando maiores efeitos após 12 meses de aplicação, tempo para reação do gesso e calcário no perfil do solo. Para o tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ de calcário e 300 kg ha⁻¹ de gesso (T4), o pH foi 5,5 e 5,36 nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente; esses valores são superiores aos dos tratamentos controle (T1) e o que recebeu somente gesso (500 kg ha⁻¹) (T3), os quais apresentaram valores de 4,2 e 4,15, respectivamente. Nessa faixa de pH (4,15 a 4,2) a disponibilidade de ânions como fosfatos e sulfatos é reduzida e a concentração de Al⁺ é elevada, o que influencia negativamente o desenvolvimento das plantas (Crusciol, 2019).

Os resultados obtidos neste estudo mostram que o uso isolado de gesso não foi eficiente para elevar o pH. O gesso isoladamente pode causar uma variação de apenas 0,3 unidades no pH (Meurer, 2010). Observa-se que o gesso quando combinado com o calcário apresenta maior potencial em reduzir a acidez trocável do solo, o que acontece por meio da reação de troca de ligantes de óxidos de ferro e alumínio com o SO₄²⁻ que desloca partículas de OH⁻, além de liberar ânions básicos provenientes da dissolução do calcário, promovendo a neutralização parcial da acidez do solo (Pivetta et al., 2019). Portanto, em cultivo em solos ácidos, é essencial a combinação de gesso e calcário.

Os resultados obtidos corroboram com Macana et al. (2023), que ao testarem doses de calcário e gesso de maneira isolada e conjunta em solos arenosos, observaram resultados melhores de pH com aplicação conjunta de gesso (2400 kg ha⁻¹) e calcário (2000 kg ha⁻¹) após 33 meses.

Em relação a V%, obteve-se resultados significativos nos dois períodos analisados. Após 12 meses da adição dos tratamentos (Figura 3B), os efeitos significativos alcançaram mais camadas do solo, até 60 cm de profundidade. O tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 300 kg ha⁻¹ de gesso (T4) apresentou V% de 75,25 na camada de 0-5 cm do solo e o tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 500 kg ha⁻¹ de gesso (T5), apresentou valores de 37,0 e 26,11 nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. O tratamento controle (T1) e o que recebeu somente gesso (500 kg ha⁻¹) (T3), apresentaram V% em torno de 29% nas camadas superficiais do solo, sendo então inferiores aos tratamentos mencionados anteriormente, demonstrando o aumento de mais de 100% na saturação por bases quando o gesso e o calcário foram aplicados de forma combinada.

A elevação da saturação de bases em camadas subsuperficiais do solo é justificada pela

dissolução da molécula do gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o qual libera na solução do solo moléculas de Ca^+ e SO_4^{2-} . O sulfato apresenta elevada mobilidade no solo e por apresentar valência negativa se liga aos cátions livres na solução do solo, deixando-os mais disponíveis para absorção radicular (Crusciol, et al., 2019). A alteração na saturação por bases mostra que os tratamentos com gesso e calcário foram eficientes nas camadas superficiais do solo, pois disponibilizaram bases trocáveis, principalmente o Ca^+ e Mg^+ , o que indica alcalinização do solo. Isso fica evidente nos resultados de capacidade de troca de cátions (CTC) que apresentaram resultados significativos 12 meses pós aplicação dos tratamentos (Figura 3C).

Os maiores valores de CTC foram observados no tratamento que recebeu calagem de maneira isolada (2000 kg ha^{-1}) (T2); 65,34 a 60,26 mmol dcm^{-3} nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm, respectivamente. Esses valores podem ser explicados pelo incremento de Ca proporcionado pela calagem. Portanto, o calcário tem efeito na transformação da CTC bloqueada pelo hidrogênio em CTC efetiva, o que aumenta suas concentrações no solo (Rheinheimer et al., 2018).

Os teores de Ca e Mg apresentaram resultados significativos nos dois períodos analisados. Para o período de 6 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 2C e 2D, respectivamente) os resultados foram significativos na camada de 0-5 cm do solo, com concentrações de 22 mmol dcm^{-3} de Ca e 12 mmol dcm^{-3} de Mg. Apresentando um decréscimo a partir da camada de 5-10 cm. O tratamento que apresentou esses valores foi constituído de 2000 kg ha^{-1} de calcário + 300 kg ha^{-1} de gesso (T4).

Para o período de 12 meses (Figura 3D e 3E), no tratamento que recebeu calagem de maneira isolada (2000 kg ha^{-1}) (T2), os efeitos significativos alcançaram mais camadas do solo, até 60 cm de profundidade para o Mg e 20 cm para o Ca. Esse acúmulo de Ca^{2+} é um importante fator a ser observado, pois o Ca apresenta baixa solubilidade no solo, com maior concentração na camada de 0–10 cm em solos arenosos (Centeno et al., 2017).

Nas camadas superficiais, o tratamento que recebeu calagem de maneira isolada (2000 kg ha^{-1}) (T2) e o que recebeu 2000 kg ha^{-1} de calcário + 500 kg ha^{-1} (T5) de gesso apresentaram valores que variaram entre 12 e 15 mmol dcm^{-3} de Mg e 25 a 32 mmol dcm^{-3} de Ca, respectivamente. A mobilidade do Ca^{2+} em superfície ocorreu devido o incremento do gesso no sistema. Segundo Bayer (2019), essa movimentação se dá devido ao efeito do SO_4^{2-} em se ligar ao Ca^{2+} , formando o par iônico CaSO_4^0 , que solubiliza a carga do Ca^{2+} e evita que esse composto se ligue as cargas do solo, deixando-o disponível na solução do solo, o que facilita sua movimentação no perfil do solo e absorção pelas plantas.

As concentrações de Ca^{2+} encontradas neste estudo estão dentro da faixa de valores

médios (15 a 35 mmol dcm⁻³) para solos paraenses (Brasil et al., 2020). Sendo assim, a adição de gesso e calcário no sistema possibilitou obter concentrações suficientes de Ca até a camada de 60 cm do solo, proporcionando maior disponibilidade desse nutriente para plantas de coqueiro anão verde do Brasil.

Os teores de Mg²⁺ no solo se mantiveram dentro da faixa adequada (5 a 15 mmol dcm⁻³) (Brasil et al, 2020) até a camada de 40 cm do solo. Para Mg observou-se o efeito similar ao Ca²⁺ em função da aplicação do gesso. Em 12 meses foi possível verificar o efeito do gesso em deslocar o Mg²⁺ até a camada de 40 cm do perfil do solo.

Os teores de K⁺ foram significativos somente no período de 12 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 3F) apresentando valores decrescentes nas camadas subsuperficiais do solo (> 20 cm). Essa redução pode ter sido gerada pelo desequilíbrio de Ca, Mg e K, resultando no processo de lixiviação do K na forma de K⁺ (Malavolta, 2006). Outra justificativa para a redução do K⁺ é a baixa disponibilidade desse nutriente nas camadas superficiais do solo, em que pode haver a formação de par iônico com os íons de SO₄⁻² (K₂SO₄⁰) aumentando assim a sua mobilidade no perfil do solo (Bayer, 2019).

O P apresentou teores significativos somente 12 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 3G). Nas camadas de 0-20 e 20-40 cm o tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ de calcário 1000 kg ha⁻¹ (T7) de gesso apresentou maiores valores (1,1 mg dm⁻³) em relação aos demais. Esse comportamento pode ser explicado pela textura arenosa do solo estudado, a qual causa menor adsorção de P e, conseqüentemente, menos P disponível para as plantas em camadas superficiais (Vinha et al., 2023).

O teor de S apresentou resultado significativo nos dois períodos analisados. Para o período de 6 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 2E), o resultado significativo foi na camada de 60-80 cm do solo, para o tratamento que recebeu gesso de forma isolada (500 kg ha⁻¹) (T3), esse comportamento pode ser justificado pela lixiviação do nutriente no perfil do solo, devido sua alta mobilidade

No segundo período de avaliação, foram observados resultados significativos para o S em quatro camadas subsuperficiais do solo (>20 cm) (Figura 3H). O comportamento do S foi linear em cada camada e crescente no perfil do solo. O uso de gesso como condicionador químico no ambiente radicular em subsuperfície disponibiliza o SO₄⁻² que estará disponível na solução do solo e irá se locomover com maior facilidade. Outro fator que pode ter influenciado nos teores de S nas camadas mais profundas do solo é a presença de óxidos de ferro e alumínio, apresentando grande capacidade na adsorção de SO₄⁻² (Crusciol, et al., 2019).

Os teores de Al^+ , H+Al e $\text{m}\%$, apresentaram redução nos dois períodos analisados em função das doses de gesso e calagem aplicadas a lanço. Para o período de 6 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 2F, 2G e 2H), os resultados apresentaram efeito significativo nas camadas superficiais, comprovando que 6 meses pós aplicação de gesso e calcário é possível observar resultados nas primeiras camadas do solo. Os valores encontrados foram de 0 a 2 mmol dm^{-3} de Al^+ , 20 a 30 mmol dm^{-3} de H+Al e um teor de 20% na saturação por alumínio no tratamento que recebeu 2000 kg ha^{-1} de calcário + 300 kg ha^{-1} de gesso (T4).

Os resultados no período de 12 meses após aplicação dos tratamentos (Figura 3I, 3J, 3K) foram mais expressivos, além de significativos em cinco profundidades do solo. Al^+ e $\text{m}\%$ não apresentaram resultados significativos na camada 60-80 cm em função da aplicação dos tratamentos.

Para H+Al , o efeito significativo ocorreu somente nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm). Esses resultados evidenciam a capacidade que o SO_4^{2-} tem em formar par iônico com o Al^+ (AlSO_4^+) composto menos tóxico para as plantas, esse comportamento ocorreu em quase todo o perfil do solo, reduzindo as concentrações de alumínio. O tratamento controle e o tratamento que recebeu somente gesso apresentaram concentrações de 5 mmol dm^{-3} , o qual é considerado elevado quando comparado aos tratamentos que receberam em conjunto gesso e calcário, os quais apresentaram redução de até 100% na concentração de Al^+ . Todos os tratamentos que receberam gesso e calcário reduziram o alumínio a 0% nas camadas superficiais do solo.

Essa redução do alumínio pode ser explicada por meio do aumento da força iônica na solução do solo em profundidade, ou seja, com a aplicação dos tratamentos houve maior disponibilidade de íons básicos (Ca, K e Mg) na solução do solo, causando diminuição da atividade do Al^+ . Outro fator importante é o aumento de Ca^{+2} no complexo de cargas, promovendo redução da $\text{m}\%$, que é a variável mais importante no controle da toxidez por alumínio para as plantas (Vargas et al., 2019). Esses resultados corroboram com Macana et al (2023), que ao trabalharem com doses de gesso e calcário de maneira isolada e conjunta em solos arenosos obtiveram resultados significativos para Al^+ com 6 meses e 18 meses após aplicação dos tratamentos.

O cobre foi o único micronutriente que apresentou efeito significativo no período de 6 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 2I), com concentração de 0,73 mg dm^{-3} para o tratamento controle. Para os demais tratamentos não houveram redução significativa da concentração de Cu.

Para o período de 12 meses após a aplicação dos tratamentos os micronutrientes que

apresentaram efeitos significativos foram B, Fe e Mn, (Figura 3L, 3M, 3N). O Mn^{2+} apresentou efeito somente na camada de 10-20 cm, com maiores concentrações no tratamento que recebeu somente calagem (2000 kg ha^{-1}) (T2), e menores concentrações em todos os tratamentos de gesso e calagem. Isso ocorreu devido a disponibilidade de Mn^{2+} diminuir com a elevação do pH (Santos, et al.,2021).

O B apresentou efeito em duas profundidades de solo distintas (0–5 e 40–60 cm), tendo efeito significativo somente no tratamento de calagem. Essa concentração em camadas distintas, sem um padrão claro no perfil do solo, pode ser explicada pela textura do solo que apresenta baixos teores de argila, o que favorece a lixiviação do B solúvel em água para as camadas mais profundas (Macana et al., 2023).

Efeitos do gesso e do calcário no estado nutricional das plantas

O Fe^{+3} apresentou resultados significativos em três profundidades do perfil do solo (0-10, 10-20 e 20-40 cm), com menores valores para os tratamentos que receberam 2000 kg ha^{-1} de calcário + 500 kg ha^{-1} de gesso (T5) e 2000 kg ha^{-1} de calcário + 700 kg ha^{-1} de gesso (T6). Esse resultado deve-se ao aumento do pH, pois meios alcalinos favorecem a diminuição da solubilidade de Fe^{+3} na solução do solo (Novais et al., 2007).

Com relação ao estado nutricional das plantas analisadas, os resultados obtidos neste estudo mostram que a aplicação de gesso combinada ao calcário influenciou a concentração de macro e micronutrientes no tecido vegetal de plantas jovens de coqueiro anão verde do Brasil, assim como as propriedades químicas do solo. As mudanças observadas foram distintas para os dois períodos analisados.

Com relação aos macronutrientes observados no tecido foliar das plantas, as concentrações de N foram influenciadas pelos tratamentos somente na avaliação realizada 6 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 4A). Enquanto P, K e Mg foram influenciados pelos tratamentos na avaliação realizada 12 meses pós aplicação dos tratamentos (Figura 4B, 4C e 4E)

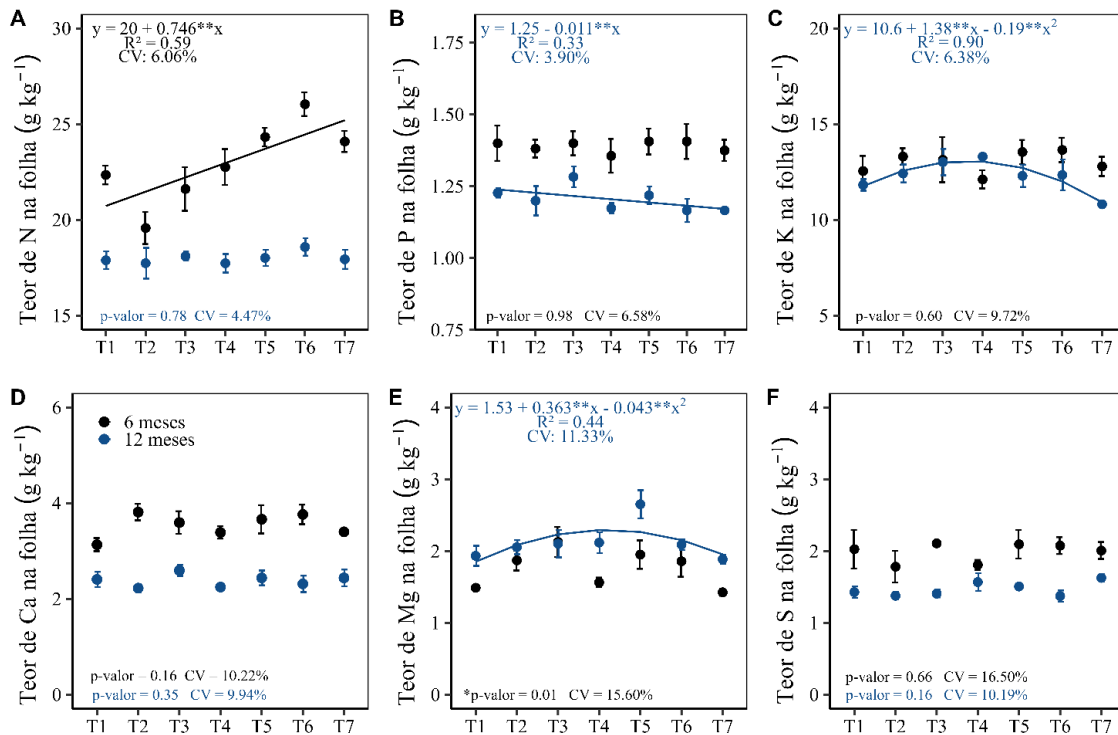


Figura 4: Influência das doses de gesso e calcário na concentração de nitrogênio - N (A), fósforo - P (B), potássio - K (C), cálcio - Ca (D), magnésio - Mg (E) e enxofre - S (F) no tecido foliar de plantas jovens de coqueiro anão verde em dois períodos de avaliação. * - significativo a $p \leq 0,05$, ** - significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; R^2 – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ($n = 16$).

As concentrações de N no tecido foliar aumentaram conforme a adição de gesso e calcário no sistema, o que é evidenciado pelo modelo linear crescente, representado pela equação $y = 20 + 0,746x$ com coeficiente de determinação de 59%. O tratamento que apresentou maior valor foi o que recebeu 2000 kg ha^{-1} de calcário + 700 kg ha^{-1} de gesso (T6) com valor de 26 g kg^{-1} de N, acima do considerado adequado por Lins et al. (2020), que é 20 g kg^{-1} para plantas jovens de coqueiro.

Quantidades ideais de N na planta promovem maior desenvolvimento vegetal, aumentam o crescimento e estrutura foliar, possibilitam maior produção de biomassa e consequentemente maior desenvolvimento de frutos, além de fazer parte da molécula de clorofila, constituinte de proteínas, ácidos nucleicos e vitaminas (Fernandes et al., 2018). A aplicação combinada de gesso e calcário na quantidade acima mencionada aumentou a absorção de N pelas plantas, em decorrência do aumento no crescimento radicular e no teor de SO_4^{2-} disponível no solo, reduzindo, com isso, a quantidade de NO_3^- lixiviada (Crusciol, et al., 2019).

As concentrações de P no tecido foliar 12 meses após aplicação dos tratamentos diminuíram com a adição de gesso e calcário, o que é evidenciado pelo modelo linear decrescente, representado pela equação $y = 125 - 0,0113x$, com coeficiente de determinação

de 33%. (Figura 4B). O tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 700 kg ha⁻¹ de gesso (T6), apresentou valor de 1,19g kg⁻¹ de P no tecido foliar, com valor próximo ao adequado Lins et al. (2020), que é 1,2 a 1,4 g kg⁻¹ para plantas jovens de coqueiro. Isso evidencia que o uso conjunto de gesso e calcário nas quantidades acima mencionadas não causaria redução significativa deste nutriente em plantas jovens de coqueiro anão.

As concentrações de K no tecido foliar, 12 meses após aplicação dos tratamentos, foram influenciadas de forma quadrática pelos tratamentos (Figura 4D). O modelo quadrático mostrou que o tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 300 kg ha⁻¹ de gesso (T4) permitiu o maior incremento de K, em torno de 13,3 g por kg⁻¹ de matéria seca, equivalendo a um aumento de 12,52% quando comparado com o tratamento controle (Figura 4D). A partir da dose 363kg ha⁻¹ de gesso a concentração de K decaiu 0,019 g kg⁻¹ para cada 1 kg de gesso aplicado (Figura 4D).

A concentração máxima alcançada para K com a adição de calcário e gesso se encontra abaixo do considerado adequado por Lins et al. (2020) que é de 18 a 21 g kg⁻¹ para plantas jovens de coqueiro. Essa melhora na concentração de K pode estar relacionada ao aumento do pH do solo proporcionado pelo gesso e calcário disponibilizados no sistema. O aumento do pH em camadas superficiais e subsuperficiais faz com que ocorra maior fixação de K⁺ e menores perdas por lixiviação no perfil do solo (Meurer, 2010)

Na concentração de Mg, a adição conjunta de gesso e calcário, 12 meses pós aplicação dos tratamentos, influenciou positivamente até o tratamento que recebeu 2000kg ha⁻¹ calcário + 500 kg ha⁻¹ gesso (T5), com incremento de 0,363 g de Mg em teores foliares para cada 1 kg de gesso adicionado junto ao calcário, como mostra a equação: $y=1,53 + 0,363 - 0,0432x^2$, e isso equivale a um aumento de 37,30% ao comparar esse tratamento com o tratamento controle (Figura 4E). Após a dose 420 kg ha⁻¹ de gesso a concentração de Mg decaiu 0,043 g kg⁻¹ para cada 1 kg de gesso aplicado (Figura 4E).

Os valores encontrados no presente estudo são justificados pela elevada concentração de Ca⁺², que tem a possibilidade de retirar Mg⁺ e K⁺ dos sítios de troca. Então, esses cátions livres na solução e formam pares iônicos com o SO₄²⁻ fornecidos pelo gesso. Desse modo, a mobilidade e movimentação desses cátions para as camadas mais subsuperficiais do solo são aumentadas, o que a maior absorção pelas plantas (Pivetta et al., 2019).

A redução do teor de alumínio trocável nas camadas mais profundas, proporcionada pela adição de gesso e calcário, diminui a competição por sítios de ligação no apoplasto entre o Al⁺³ e Mg²⁺, melhora a atividade de transportadores de Mg²⁺ e de canais de cátions permeáveis a Mg²⁺ e reduz a competição de Mg²⁺ e Al⁺³ na molécula de ATP (Fernandes et

al., 2018). Sendo assim, o gesso e o calcário aplicados no solo, além de reduzir o Al^{+3} promove incremento de Mg, o que irá refletir nas concentrações foliares desses dois nutrientes, reduzindo de forma significativa os teores Al na planta. Atingir concentrações ideais de Mg no tecido foliar é importante para o desenvolvimento das plantas, pois o Mg é um nutriente constituinte da clorofila, ativador enzimático e apresenta a capacidade de migração para diversas partes da planta em via de desenvolvimento, contribuindo para a formação de novos tecidos vegetais (Bayer, 2019).

Com relação aos micronutrientes presentes no tecido foliar, o Na teve suas concentrações influenciadas pelos tratamentos somente na análise de 6 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 5F), enquanto para o Mn, Zn, Na e Cl as mudanças nas suas concentrações no tecido foliar foram significativas somente 12 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 5D, 5E, 5F e 5G).

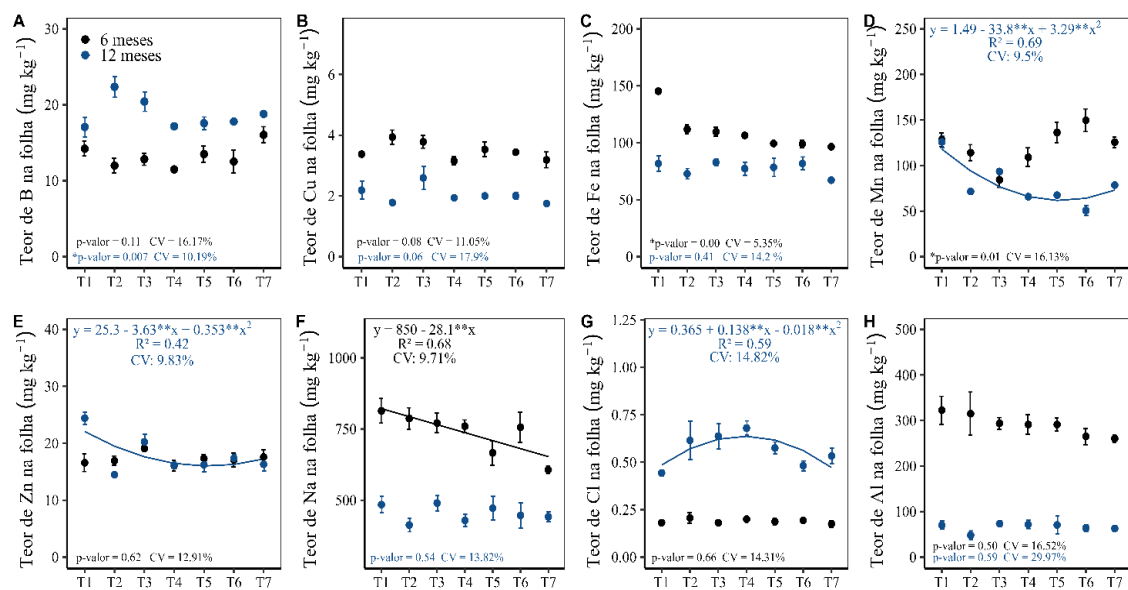


Figura 5: Influência das doses de gesso e calcário nas concentrações de boro – B (A), cobre - Cu (B), ferro - Fe (C), manganês – Mn (D), zinco – Zn (E), sódio – Na (F), cloro – Cl (G) e alumínio – Al (H) no tecido foliar de plantas jovens de coqueiro anão verde em dois períodos de avaliação. *- significativo a $p \leq 0,05$, ** - significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; R² – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 16).

As concentrações de Mn no tecido foliar, 12 meses após aplicação dos tratamentos, foram influenciadas de forma quadrática pela adição de gesso e calcário no sistema (Figura 5D). Os maiores valores foram encontrados nos tratamentos controle e no com aplicação isolada de gesso (500 kg ha^{-1}), com valores de $125,93 \text{ mg kg}^{-1}$ e $93,43 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente.

As concentrações de Zn no tecido foliar, 12 meses após aplicação dos tratamentos, foram influenciadas de forma quadrática pela adição de gesso e calagem no sistema (Figura 5E). Os maiores valores foram encontrados para o tratamento controle e para o tratamento de aplicação isolada de gesso (500 kg ha^{-1}), com valores de $21,25 \text{ mg kg}^{-1}$ e $20,25 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente.

Os resultados obtidos para Mn e Zn apresentaram o mesmo comportamento. A redução na concentração de Mn e Zn no tecido vegetal com a adição de gesso e calcário pode ser justificada pelo conjunto: pH elevado, boa drenagem e aeração, o qual causa efeito contrário à disponibilidade de Mn, mesmo quando a quantidade total do elemento no solo é grande, pode apresentar baixa disponibilidade para absorção pelas plantas. A maior disponibilidade desse elemento é maior em solos com drenagem limitada ou em solos alagados (Novais et al. 2007).

Quando ocorre a elevação do pH no solo, a forma iônica dos micronutrientes catiônicos é modificada, resultando em oxi-hidróxidos, que apresentam comportamento insolúveis, com baixa capacidade de fornecer íons necessários para o crescimento das plantas (Malavolta, 2006). Portanto, a adição de gesso e calcário de Neossolo Quartzarênico apresentou efeitos negativos na absorção de Zn e Mn na planta. Apesar disso, esses resultados não limitaram o desenvolvimento das plantas de coqueiro analisadas neste estudo.

As concentrações de Na no tecido foliar, 6 meses após aplicação dos tratamentos, foram influenciadas de forma linear pela adição de gesso e calagem no sistema (Figura 5F). As concentrações diminuíram conforme a adição de gesso e calagem no sistema, o que é evidenciado pelo modelo linear decrescente, representado pela equação $y = 850 - 28,1x$. O tratamento que apresentou maior valor foi o tratamento controle com valor de $813,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de Na no tecido vegetal e menor valor foi o tratamento que recebeu 2000 kg ha^{-1} de calcário + 1000 kg ha^{-1} de gesso (T7) com valor de $679,7 \text{ mg kg}^{-1}$.

A aplicação de gesso e calcário de forma conjunta fornecem cálcio para a solução do solo nas camadas superficiais e subsuperficiais, o que facilitará a movimentação do SO_4^{2-} no perfil do solo, esse sulfato irá se ligar ao Na, que sofre processo de lixiviação pela água de drenagem na forma de sulfato de sódio (Costa et al., 2020). Esses resultados são relevantes, pois solos com elevados teores de Na, apresentam maior saturação por sódio, o que resulta em ambientes de estresse salinos, resultando no impedimento químico de outros nutrientes. Além disso, o íon Na^+ , em elevadas concentrações, pode substituir o K^+ em algumas funções na planta, o que pode afetar o equilíbrio iônico interno das células do tecido vegetal (Fernandes, 2018).

A adição de gesso e calcário, 12 meses após aplicação dos tratamentos, influenciou

positivamente até o tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ calcário + 300 kg ha⁻¹ gesso (T4), com incremento de 0,138 mg de Cl em teores foliares para cada 1 kg de gesso adicionado junto ao calcário, como mostra a equação: $y = 0,365 + 0,138x - 0,0175x^2$, isso equivale a um aumento de 110,52% ao comparar esse tratamento com o tratamento controle (Figura 5G). Após a dose 394 kg ha⁻¹ de gesso a concentração de Cl decaiu 0,0175 g kg⁻¹ para cada 1 kg de gesso aplicado (Figura 5G). As concentrações de Cl no tecido vegetal são justificadas pela sua disponibilidade na solução do solo, sendo esse um elemento que fica mais disponível para as plantas com a elevação do pH, assim como encontrado neste estudo. Além disso, a adição de gesso e calcário no sistema incrementou o desenvolvimento radicular, proporcionando assim, o maior alcance de raízes finas para absorver esse nutriente.

Efeitos do gesso e do calcário no desenvolvimento radicular

Para as variáveis de desenvolvimento radicular obteve-se diferenças estatísticas no crescimento de raízes finas e largura alcançadas das raízes finas no interior do rizotron no período de 12 meses após a aplicação dos tratamentos (figura 6). A variável de largura de raízes finas apresentou valores significativos para o período de 12 meses das aplicações dos tratamentos (Figura 6C) e se ajustou ao modelo de regressão linear crescente representado pela equação $y = 59,1 + 1,07x$.

A variável de crescimento de raízes finas foi significativa após 12 meses das aplicações dos tratamentos (Figura 6B), se ajustou ao modelo de regressão quadrática representado pela equação $y = 59,1 - 9,55x + 1,77x^2$ com coeficiente de determinação igual a 85%.

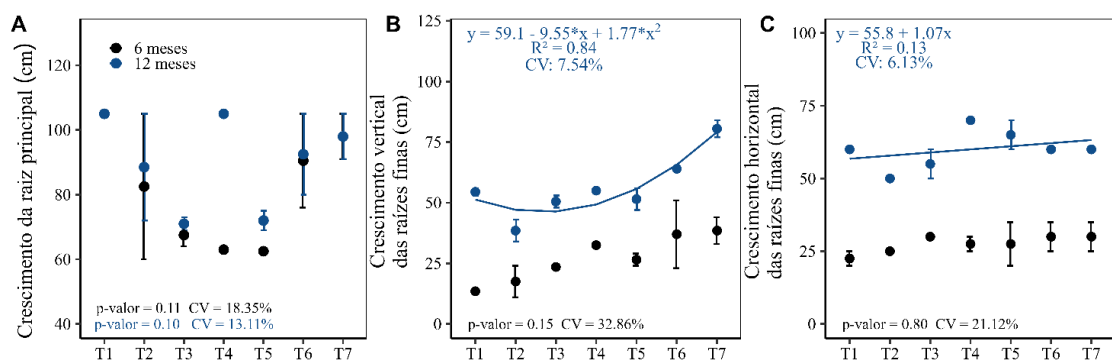


Figura 6: Influência das doses de calcário e gesso no comprimento de raiz principal (cm), comprimento de raízes finas e largura das raízes finas (cm) em análise de rizotron de plantas jovens de coqueiro anão verde em dois períodos de avaliação. * - significativo a $p \leq 0,05$, ** - significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; R^2 – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ($n = 5$).

As plantas que apresentaram maior desenvolvimento de raízes finas foram as que

receberam a concentração de 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 1000 kg ha⁻¹ de gesso (T7). Além disso, o tratamento que recebeu 2000 kg ha⁻¹ de calcário + 500 kg ha⁻¹ de gesso (T5) também apresentou resultados expressivos, o que condiz com outros resultados encontrados nesta pesquisa, pois com essa dose houve incrementos na absorção de nutrientes. Esse comportamento pode ser explicado pela melhor condição do solo, considerando a variação do pH de 5,5 a 5 nas camadas de 0-5 e 5-10 cm e nas camadas mais subsuperficiais com valores médios de 4,5; pela redução da saturação por alumínio a concentração de 0% nas camadas mais superficiais e nas camadas subsuperficiais com saturação por alumínio variando de 20 a 30%.

Assim, foi possível observar melhor desenvolvimento radicular, alongamento das raízes e maior volume de solo ocupado por raízes finas. Maior concentração de raízes aumenta a área superficial de absorção de água e nutrientes, aumentando a capacidade de translocar solutos para a parte aérea. Melhorar as condições do solo nas camadas subterrâneas pode aumentar e/ou estabilizar o rendimento das culturas, especialmente em regiões com distribuição irregular de chuvas, como a região amazônica, que também é caracterizada por solos deficientes em Ca no subsolo, muitas vezes em associação com a toxicidade do Al (Haneklaus et al., 2020). A redução na saturação por alumínio evidencia o efeito do gesso no solo, que possibilitou a ligação iônica do sulfato com o alumínio trocável, formando composto não tóxico para as plantas (Minato et al., 2023).

Desse modo, foi possível observar um melhor desenvolvimento radicular, alongamento das raízes, maior volume de solo ocupado por raízes finas. A maior concentração de raízes aumenta a área de superfície para absorção de água e nutrientes, desenvolvendo a capacidade de translocar solutos para a parte aérea das plantas.

Portanto, pode-se inferir que o aumento no crescimento radicular dos coqueiros jovens proporcionará melhor desenvolvimento das plantas adultas, influenciando no teor de nutrientes na parte aérea da planta, conseqüentemente na sua produtividade e qualidade dos frutos.

CONCLUSÕES

A dose de 2.000 kg ha⁻¹ de calcário + 500 kg ha⁻¹ de gesso foi eficiente em reduzir a acidez total, saturação de alumínio e alumínio trocável e aumentar a saturação de enxofre e bases, além de influenciar os teores de N, Mg e K nas folhas e melhorar o desenvolvimento radicular em coqueiros cultivados em Neossolo quartzarênico na região Norte do Brasil. Esse comportamento pode ser observado até 12 meses após a aplicação dos tratamentos.

REFERÊNCIAS

- Bayer, C., Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. *Soil Tillage Res* 193, 27–41. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.005>.
- Brasil, E. C.; Cravo, M.DA S.; Viégas, I. de J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 419p.
- Centeno, L.N., et al. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, Pelotas v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017. <https://doi.org/10.15210/rbes.v4i1.11576>.
- Costa, B. P.; et al. uso do calcário e do gesso agrícola em duas épocas de implantação do coffee arabica. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 241–247, 2020. DOI: 10.21206/rbas.v10i1.9940.
- Costa, C.H.M.; et al. Gessagem No Sistema Plantio Direto. *Journal Of Agronomic Sciences*, V.4, N.Especial, P.201-215, 2015: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/>.
- Crusciol, C.A.C., et al. Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 115, 1–26. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10017-0>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. 21.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41p.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. World production. Rome, 2021. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/342/default.aspx>. Acesso em: 30 jan. 2024.
- Fernandes, M. S., Souza. S. R., Santos. L.A., Nutrição mineral de plantas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-2. Ed- Viçosa, MG, 2018.
- Fróes Júnior, P.S.M.; et al. Sources of growth and spatial concentration of coconut crop in the state of Pará, Brazilian Amazon. *Journal of Agricultural Science*, v.11, p.159-168, 2019. <https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/38068>.
- Haneklaus, N.; et al. closing the upcoming eu gypsum gap with phosphogypsum Recurso. *Conservar. Reciclar.* 2022 , 182 , 106328.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção de coco-da-baía. 2021. Available at: < <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/coco-da-baia/br>>. Access on: September 22, 2023.
- Jochua, C.N.; et al. Root phenotypic diversity in common bean reveals contrasting strategies for soil resource acquisition among gene pools and races. *Crop Science*, v.60, p.3261-3277, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/csc2.20312>.

- Lins, P.M.P.; Viégas, I.J.M. Coqueiro. In: BRASIL, E.C.; CRAVO, M.S.; VIÉGAS, I.J.M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2020. p.347-349.
- Macana Marinõ, Y.A, Corrêa, R.S, de Toledo, F.H.S.F. *et al.* Soil fertility, root growth, and Eucalypt productivity in response to lime and gypsum applications under soil water deficit. *Novas Florestas* 54, 833–852(2023). <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09943-9>
- Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 631 p.
- Martin-Prével, P., Gagnard,J., Gautier, P. (Ed.) L’analyse végétale dans le contrôle de l’alimentation des plantes tempérées et tropicales. Paris: Tec&Doc, p.447-57, 1984.
- Metcalfé, D. Measuring root dynamics in tropical ecosystemsa *field manual*. *Plant and Soil*, v.311, p.189-199, 2008.
- Meurer, E.J., Fundamentos de Química do Solo. 4a Ed. Porto Alegre, RS: Evangraf, 2010.v.1.264p.
- Minato. E. A.; et al. Lime and gypsum application to low-acidity soils: Changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. *Soil and Tillage Research*,2023.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198723002271>.
- Nolla, A.; et al. Correction of soil acidity and availability of phosphorus and potassium in an oxisol submitted to surfaced and incorporated liming. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 2478–2487, 2020. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/16944>.
- Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- Pivetta, L. A. et al. Gypsum application, soil fertility and cotton root growth. *Bragantia*, v. 78, n. 2, p. 264–273, 2019.
- Santos, F.D., Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. *TECNO-LÓGICA*, Santa Cruz do Sul, v. 25, n. 2, p. 272-278, jul./dez. 2021.
- Santos, H. G. dos; et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília,DF.Embrapa,2018..<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358172.epub>.
- Silva, W.T.DE M., et al. Levantamento da textura do solo e da relação silte/argila em regiões semiáridas do Nordeste. *Agropecuária científica no semiárido*, v. 14, n. 4, p. 266- 272, 2019.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. Manual de métodos de

análise de solo. 3.ed. Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574p.

Tiecher, T.; et al. Crop Response to Gypsum Application to Subtropical Soils Under No-Till in Brazil: a Systematic Review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170025>.

Vargas, J. P., D. R. Santos, M. C. Z. Bastos, G. Schaefer, and P. B. Parisi. 2019. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. *Soil and Tillage Research* 185:47–60. doi:10.1016/j.still.2018.08.014.

Vinha, A. P. C.; et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. *Nativa, [S. l.]*, v. 9, n. 1, p. 30–35, 2023. DOI: 10.31413/nativa.v9i1.10973.

CAPÍTULO 2: IMPACTO DO GESSO AGRÍCOLA E CALCÁRIO NA QUALIDADE QUÍMICA DE UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA

HIGHLIGHTS:

Aplicação de gesso e calcário melhora a qualidade química do Neossolo Quartzarênico;

A dose de 500 kg ha⁻¹ de gesso reduz a saturação por alumínio e eleva a saturação por bases do solo;

A aplicação a lanço de gesso influencia positivamente nos teores de Mg, S, P e K no perfil do solo.

Resumo

Os solos amazônicos têm como características elevada acidez e saturação por alumínio, além de baixa saturação por bases, o que influencia na disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas. Em sistemas de monocultivo de coqueiro são utilizadas técnicas de manejo como aração, gradagem, aplicação de fertilizantes químicos e, em determinados casos, o uso do gesso agrícola e calcário. O gesso e o calcário promovem uma maior eficiência na absorção de nutrientes pelas plantas permitindo melhores produtividades para as culturas e, podem influenciar positivamente a qualidade química, física e biológica do solo. Partindo deste pressuposto, objetivou-se com este estudo avaliar a qualidade química de um Neossolo Quartzarênico doze meses após a aplicação de gesso agrícola em um sistema de monocultivo de coqueiro anão verde, no estado do Pará. O delineamento experimental foi em blocos inteiramente casualizados (BIC), sendo 4 blocos e 5 tratamentos: T1 = controle; T2 = 300 kg ha⁻¹ de gesso; T3 = 500 kg ha⁻¹ gesso; T4 = 700 kg ha⁻¹ gesso; T5 = 1000 kg ha⁻¹ gesso. Foi calculado o índice de qualidade do solo por meio da análise fatorial. A aplicação superficial de gesso apresentou respostas positivas nos atributos químicos do solo após 12 meses a aplicação

Palavras chave: saúde do solo, índice de qualidade, fertilidade, sulfato de cálcio, calagem

Abstract:

Amazonian soils have high acidity and aluminum saturation, as well as low base saturation, which influences the availability of essential nutrients for plants. In coconut monoculture systems, management techniques such as plowing, harrowing, application of chemical fertilizers and, in certain cases, the use of agricultural gypsum and limestone are used. Gypsum and limestone promote greater efficiency in nutrient absorption by plants, allowing better yields for crops and can positively influence the chemical, physical and biological quality of the soil. Based on this assumption, the objective of this study was to evaluate the chemical quality of a Quartzarenic Neosol twelve months after the application of agricultural gypsum in a monoculture system of dwarf coconut trees in Brazil, in the state of Pará. The experimental design was in completely randomized blocks (BIC), with 4 blocks and 5 treatments: T1= control; T2= 300 kg ha⁻¹ of gypsum; T3= 500 kg ha⁻¹ gypsum; T4= 700 kg ha⁻¹ gypsum; T5= 1000 kg ha⁻¹ gypsum. The soil quality index was calculated through factor analysis. The surface application of gypsum showed positive responses in the chemical attributes of the soil after 12 months of application

Keywords: soil health, quality index, fertility, calcium sulfate, liming

INTRODUÇÃO

Os solos na produção agrícola desempenham papéis ecológicos fundamentais, como meio para crescimento vegetal, regulador e purificador de água, habitat para organismos do edáficos, modificador da atmosfera e sistema de reciclagem de nutrientes e resíduos orgânicos (Brady et al., 2013). Entretanto, quando utilizados em sistemas de cultivo em larga escala, os atributos do solo podem ser alterados, devido à substituição da cobertura natural por sistemas produtivos. Essa mudança na cobertura vegetal pode comprometer a qualidade do solo, e consequentemente, a sua capacidade produtiva e a biodiversidade vegetal e animal (Silva et al., 2015).

Em plantios convencionais utilizam-se técnicas e manejos que podem influenciar as características químicas, físicas e biológicas do solo, devido à utilização de maquinários, ao revolvimento do solo e aplicação de adubos químicos e defensivos agrícolas (Tal, 2018). De fato, em sistemas de monocultivo, essas técnicas são empregadas, além de cobertura do solo para que este não fique exposto, o que poderia ocasionar lixiviação e perda de matéria orgânica (Silva et al., 2020). Apesar da adoção da cobertura do solo, algumas das limitações do cultivo convencional ou monocultivo em solos amazônicos estão relacionadas às suas características químicas como elevada acidez, elevada saturação por alumínio e baixa saturação por bases, o que afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas (Wadt, 2021). Adicionalmente à elevada intemperização dos solos Amazônicos, solos com textura arenosa são caracterizados por baixa fertilidade natural e alta lixiviação de nutrientes, contudo, são amplamente utilizados em sistemas agrícolas, como os cultivos de coqueiro, e exigem intervenções corretivas para otimizar sua produtividade. Dessa forma, o uso de fertilizantes químicos inorgânicos, assim como a aplicação do gesso e calcário agrícola, é frequentemente necessário para promover o adequado desenvolvimento das culturas em tais condições.

O conceito de qualidade do solo foi desenvolvido para identificar solos, definir as melhores práticas de manejo e aplicações para cada solo e examinar as mudanças nas propriedades do solo (Singer, Sojka, 2002). Várias abordagens de qualidade do solo foram desenvolvidas, no entanto o índice de qualidade do solo é a abordagem mais comumente usada devido a sua flexibilidade quantitativa (Larson, Pierce, 1991).

Portanto é evidente a necessidade de compreender como essas práticas de manejo podem influenciar a qualidade química do solo em longo prazo e promover uma produção agrícola sustentável em sistemas com características adversas, como os solos amazônicos.

Desse modo, objetivou-se com este estudo determinar a dose de gesso que mais favorece a qualidade química do solo após 12 meses à aplicação de gesso em um sistema de monocultivo de coqueiro anão verde.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na fazenda Reunidas Sococo (1°13'42" S e 48°02'57" W) no município de Santa Isabel do Pará, cujo clima da região é tropical úmido do tipo Am segundo a classificação de Köppen e Geiger, com temperatura média mensal de 25°C. Durante o período experimental foram registradas precipitações e temperaturas mínimas e máximas, variando de 21,9 a 32,9°C) no local, mostradas na Figura 1.

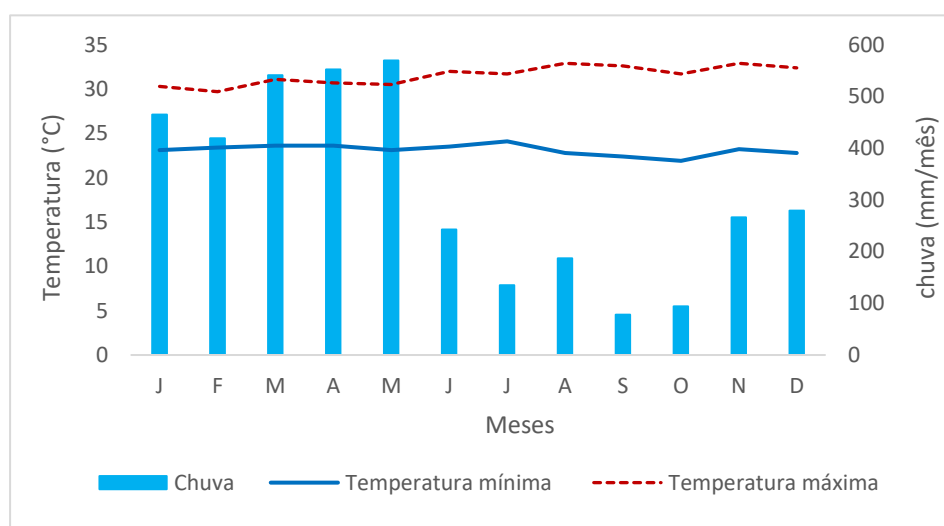


Figura 1: Precipitação mensal e temperaturas máximas e mínimas durante o período experimental

O solo da área experimental foi caracterizado como Neossolo Quartzarênico distrófico (Brasil et al., 2020). O experimento foi implantado em fevereiro de 2020. As mudas da variedade coco anão verde foram plantadas com o espaçamento de 7,5 x 7,5 x 7,5 metros, formando um triângulo equilátero. O clima da região é tropical úmido do tipo Am segundo a classificação de Köppen e Geiger, com temperatura média mensal de 25°C.

Análise de caracterização do solo

Para caracterização da área antes da aplicação dos tratamentos foram coletadas amostras compostas de solos em seis profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm) que apresentaram características químicas e granulométricas demonstradas na Tabela 1. A

preparação das amostras e as análises químicas foram realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017).

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico antes da instalação do experimento, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm

PROF	pH (CaCl ₂)	pH (SMP)	-----mg dm ⁻³ -----				-----mmolc dm ⁻³ -----						
			M O	COrg	S	P	K	Ca	Mg	Al	CTC	V%	m%
0-5	4,2	6,1	18,5	10,8	7,8	4,0	0,4	6,8	2,0	5,8	49,5	19,3	38,5
5-10	4,1	6,0	16,8	9,8	6,3	3,3	0,3	5,5	1,8	7,3	49,1	16,0	48,2
10-20	4,2	6,1	15,0	8,8	7,3	4,1	0,2	4,8	1,8	7,0	45,8	15,0	50,3
20-40	4,3	6,2	9,0	5,3	9,0	1,6	0,1	3,0	1,0	8,0	39,8	10,8	64,9
40-60	4,3	6,2	6,3	3,3	12,5	1,5	0,1	3,0	1,0	7,0	37,3	11,5	60,9
60-80	4,4	6,5	4,3	2,3	15,0	0,9	0,2	3,3	1,3	5,8	30,6	15,8	54,7

PROF	B	Cu	Fe	Mn	Zn	PROF	Areia	Silte	Argila
0-5	0,3	0,3	153,8	8,4	1,6	0-5	829	78	93
5-10	0,2	0,2	183,8	6,1	1,0	5-10	842	77	81
10-20	0,3	0,3	228,8	5,1	0,8	10-20	828	96	76
20-40	0,2	0,2	286,3	2,3	0,1	20-40	803	136	61
40-60	0,1	0,1	292,5	1,4	0,1	40-60	798	115	87
60-80	0,1	0,2	278,8	1,8	0,1	60-80	757	111	132

P, Mn, Fe, Cu, Zn – Extrator Mehlich 1; Ca, Mg, K – Extrator Resina; B – Método água quente.

Aplicação dos tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento experimental blocos inteiramente casualizados (BIC) com 4 blocos experimentais (Figura 2).

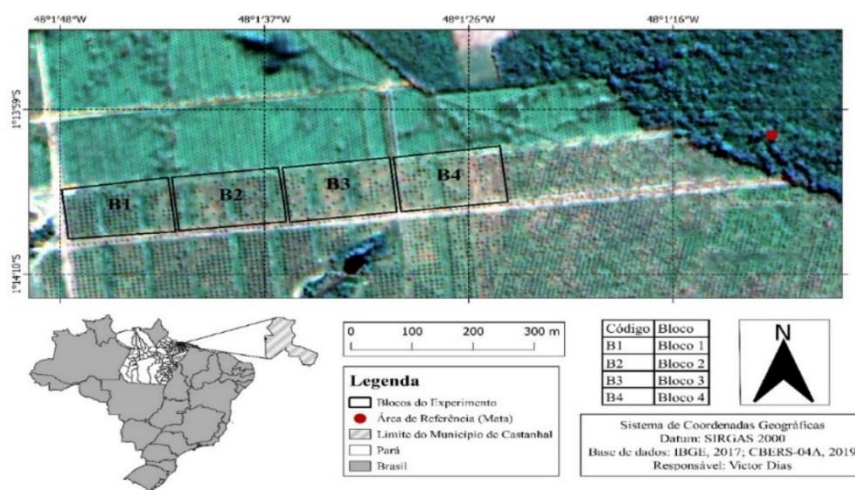


Figura 2: Mapa referente à área experimental

Os tratamentos consistiram em doses de gesso aplicado a lanço, sendo eles: T1 =

controle; T2 = 300 kg ha⁻¹ de gesso; T3 = 500 kg ha⁻¹ gesso; T4 = 700 kg ha⁻¹ gesso; T5 = 1000 kg ha⁻¹ gesso. As doses de gesso foram calculadas em relação a necessidade de calagem (2000 kg ha⁻¹).

Assim, o experimento foi composto por 5 tratamentos e 4 repetições, perfazendo 20 parcelas experimentais e cada parcela composta por 25 plantas. Foi realizada a aplicação de calcário na área experimental em uma concentração de 2000 kg ha⁻¹.

Os tratamentos foram aplicados em novembro de 2021, 19 meses após a implantação do pomar. As fontes de gesso e calcário utilizadas foram Calcário Dolomítico: (CaO: 36%; PRNT: 91%) e gesso: (Ca: 16%; S: 15%). A adubação de fundação consistiu na aplicação de 0,3 kg de super fosfato simples (SFS) por planta, após este período, realizou-se adubação com NPK (10-07-10) ano de 2021, na concentração de 0,5kg por planta. O pomar não recebeu nenhum tipo de irrigação específica, contando apenas com as chuvas.

Análise química do solo após aplicação dos tratamentos

A análise dos efeitos dos tratamentos foi realizada após 12 meses de aplicação dos tratamentos. Para análise de fertilidade do solo foram coletadas 120 amostras compostas em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm). As amostras de solo foram secas ao ar peneiradas em malha de 2 mm.

As análises químicas realizadas foram: potencial hidrogeniônico (pH), acidez potencial (H+Al), íon cálcio (Ca⁺²), íon magnésio (Mg⁺²), íon alumínio (Al⁺³), íon potássio (K⁺), fósforo disponível (P), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), e carbono orgânico (COrg) (Teixeira et al. 2017). Após os resultados calculou-se a capacidade de troca de cátions (CTC); saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). Para a análise fatorial, foi realizada a média ponderada entre as camadas do solo de acordo com a equação:

$$M_p = \frac{(N_i x P_i) + (N_j x P_j) + \dots + (N_y x P_y)}{P_1 + P_2 + P_3 \dots + P_y}$$

Ou seja:

$$M_p = \frac{(0-5 \text{ cm} \times 5) + (5-10 \text{ cm} \times 5) + (10-20 \text{ cm} \times 10) + (20-40 \text{ cm} \times 20) + (40-60 \text{ cm} \times 20) + (60-80 \text{ cm} \times 20)}{80}$$

Onde: M_p é a média ponderada de cada variável, N_i é o teor/valor de cada variável na profundidade P_i, e P_i é a espessura de cada profundidade.

Obtendo-se resultados referentes a camada de 0-80 cm, representando todo o perfil do

solo analisado.

Análises de regressão

As análises estatísticas foram executadas usando o software R versão 4.2.0. Foram realizadas análises de regressão (linear e quadrática) para avaliar os atributos químicos do solo; as equações foram escolhidas com base na significância dos coeficientes. Os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade foram verificados por meio dos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Para todas as análises, foi utilizada a função `dbc` do pacote `ExpDes.pt`.

Análises fatoriais

A análise fatorial foi empregada para compreender a relação da aplicação de gesso e calcário agrícola nas propriedades químicas do solo. Selecionamos um conjunto de indicadores químicos do solo que podem afetar a fertilidade do solo: pH, H+Al, Ca⁺², Mg⁺², Al⁺³, K⁺, P, S, B, Cu, Mn, Fe, COrg, CTC, V%, m%; dentre essas, as variáveis que não apresentaram efeito significativo foram excluídas do banco de dados. Verificou-se a multicolinearidade entre essas variáveis significativas por meio da Correlação de Pearson (> 0.90); em caso de correlação superior a 0,90, mantivemos no banco de dados a variável que representava um processo simples no solo. Por exemplo, encontramos alta correlação entre m% e Al⁺³, considerando que a Al⁺³ representa o total de acidez do solo, optamos por deixá-la e excluir o m%.

Verificou-se a adequação dos dados para a análise fatorial usando o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e o teste de esfericidade de Bartlett. O teste de KMO compara as magnitudes dos coeficientes de correlação observados com as magnitudes dos coeficientes de correlação observados com as magnitudes dos coeficientes de correlação parcial. Valores de KMO <0.5 indicam que a análise fatorial não é adequada. O teste de Bartlett é usado para examinar a hipótese de que as variáveis não são correlacionadas na população. Resultados significantes para essa análise leva a rejeição da hipótese nula e conclui que as correlações nos dados são apropriadas para a análise fatorial. O resultado do teste de esfericidade de Bartlett a um nível de probabilidade de 5% (significância a 95%) é considerado apropriado para a análise fatorial.

Foram selecionados os fatores com autovalor maior que 1 para os tratamentos aplicados. Sendo gerados dois fatores, PC1: Mg, V% e m%, PC2: P, K e S. Avaliou-se a comunalidade das variáveis. A comunalidade é a parcela da variância que uma variável compartilha com

todas as outras variáveis consideradas, representando a proporção de variância explicada pelos fatores comuns

Desse modo, eliminou-se do conjunto de dados as variáveis que apresentaram comunalidade < 0.5 . Os fatores foram submetidos à rotação varimax para aprimorar a interpretabilidade dos fatores, após isso foi gerado o índice de qualidade e foram extraídos os dois fatores na análise fatorial. Em seguida, foi aplicada a regressão sobre os fatores individuais (PC1 e PC2) e para o índice de qualidade para achar o tratamento com melhor qualidade do solo

O mapa de calor foi gerado usando a distância euclidiana método empregado para discriminar a aplicação de gesso bem como sua influência nos atributos químicos do solo, apresentando características que mais se aproximam assemelhados ou contrastados entre si. Todas as análises estatísticas foram processadas em ambiente R (R Core Team, 2022)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nutrientes no perfil do solo

Efeitos significativos após 12 meses da adição de gesso foram encontrados na camada de 0-80 cm do solo analisado, refletindo no incremento de fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), elevação da saturação por bases (V%), e diminuição nos teores de saturação por alumínio (m%) (Figura 3). Embora significativos, apenas P e S apresentaram R^2 superior a 0,71. pH, H+Al, Ca^{+2} , Al^{+3} , B, Cu, Mn, Fe, COrg e CTC não apresentaram efeito significativo.

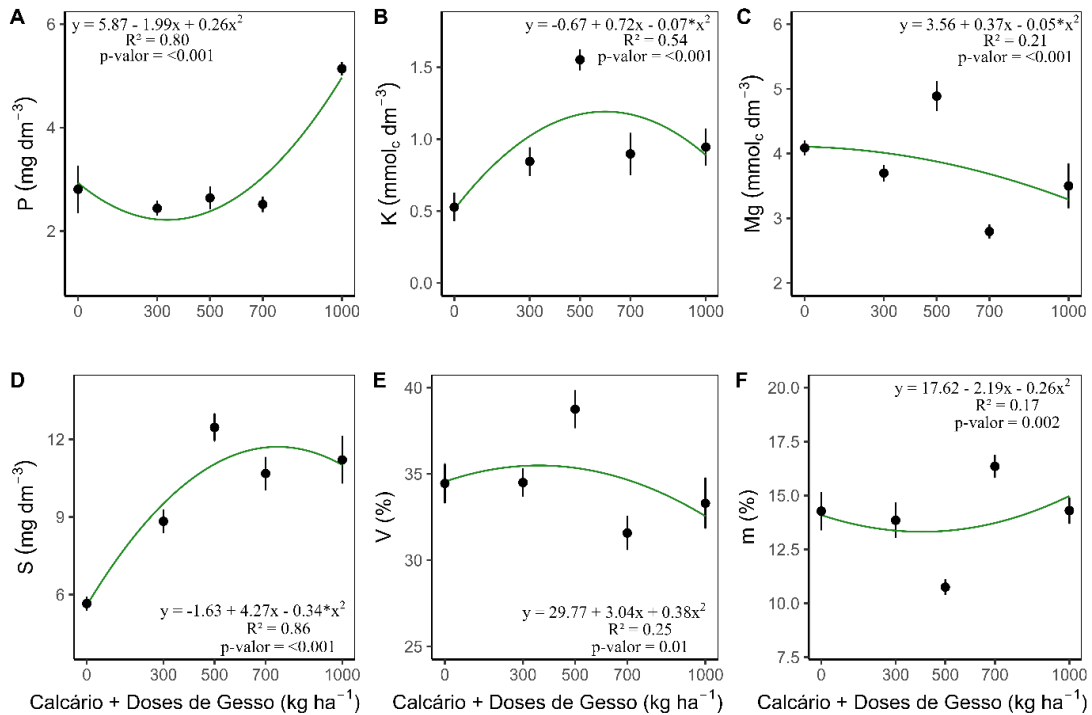


Figura 3: Concentração de fósforo(P), potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) e em um Neossolo Quartzarênico em um perfil de 0-80 cm em função das doses de gesso.

Esses resultados podem ser explicados pela adição de gesso combinado com calcário no solo, mostrando que o tratamento composto somente pelo calcário apresentou valores inferiores aos demais tratamentos para as variáveis em questão, isso demonstra que o uso combinado de gesso e calcário promovem uma melhor saúde química do solo, podendo promover melhoras para o desenvolvimento e produção de plantas de coqueiro anão verde.

Para a variável P o tratamento que recebeu 1000 kg ha⁻¹ de gesso, apresentou maior valor (5,14 mg dm⁻³) em relação aos demais tratamentos (Figura 3A). Essa concentração de P no solo foi 82% superior ao tratamento sem gesso no perfil de 0-80 cm. Sugere-se que o responsável por esse resultado é o gesso agrícola (CaSO₄·2H₂O), que é considerado um condicionante no solo e quando solubilizado, promove melhor desenvolvimento radicular, tornando maior o volume explorado pelas raízes (Bayer, 2019). Esses resultados corroboram com Queiroz (2005) que, ao avaliar as alterações químicas do solo e o rendimento da soja e sorgo implantados simultaneamente, verificou que na presença de gesso houve aumento linear do teor de P no solo.

O P apresenta baixa mobilidade no solo, sendo absorvido predominantemente por difusão e as alterações químicas provocadas pelo gesso permitem o acesso das raízes às regiões do solo que normalmente não seriam exploradas, contribuindo para o melhor

aproveitamento da adubação fosfatada ou do fósforo já existente na solução do solo (Vinha, 2021). O gesso também é responsável pela adsorção de sulfato o que favorece a fixação de fósforo, uma vez que compete pelos mesmos sítios de adsorção do fosfato, tornando o fósforo mais disponível na solução do solo, conseqüentemente, melhorando sua absorção para as plantas (Brasil et al., 2020). Portanto, sugere-se que a utilização de 1000 kg ha⁻¹ de gesso favoreceu a disponibilização de P no perfil de 0-80 cm do solo.

A concentração de K no solo, 12 meses após aplicação dos tratamentos, foi influenciada de forma quadrática pelos tratamentos (Figura 3B). O modelo quadrático mostrou que o tratamento que recebeu 500 kg ha⁻¹ de gesso permitiu o maior incremento de K no solo, em torno de 1,02 mmol dcm⁻³, equivalendo a um aumento de 192% quando comparado com o tratamento controle (Figura 1B). A partir da dose 514 kg ha⁻¹ de gesso a concentração de K decaiu 1,18 mmol dcm⁻³ para cada 1 kg de gesso aplicado (Figura 3B).

A adição de gesso ao solo promove interações químicas que permitem o K atingir camadas subsuperficiais, promovendo, assim, a reciclagem de K. No entanto, segundo Brasil et al. (2020) e Gomes et al. (2024) indicam que, em solos arenosos, a aplicação de altas doses de gesso pode resultar na lixiviação do K. Esse resultado também é observado neste estudo, que registrou uma redução significativa na concentração de K quando se aplicou uma dose superior a 514 kg ha⁻¹ de gesso.

A redução de Potássio (K) na solução do solo com o aumento na concentração de gesso pode ter sido gerada pelo excesso de gesso, o que possivelmente provocou o desequilíbrio de Ca, Mg e K, resultando no processo de lixiviação do K na forma de K⁺ (Malavolta, 2006). Além disso, infere-se que a redução do K⁺ pode ter sido causada também pela baixa disponibilidade desse nutriente nas camadas superficiais do solo, onde pode haver a formação de par iônico com os íons de SO₄²⁻ (K₂SO₄⁰) aumentando assim a sua mobilidade no perfil do solo (Bayer, 2019). Dessa forma, sugere-se que a dose de 514 kg ha⁻¹ é a mais adequada para otimizar os processos químicos do K no solo.

A concentração de Magnésio (Mg) no solo, 12 meses após aplicação dos tratamentos, foi influenciada de forma quadrática pelos tratamentos (Figura 3C). O modelo quadrático mostrou que o tratamento que recebeu 500 kg ha⁻¹ de gesso, permitiu o maior incremento de Mg no solo, em torno de 0,8 mmol dcm⁻³, equivalendo a um aumento de 19,55% quando comparado com o tratamento controle (Figura 3C). A partir da dose 570 kg ha⁻¹ de gesso a concentração de Mg decaiu 1,24 mmol dcm⁻³ para cada 1 kg de gesso aplicado (Figura 3C).

A solubilização do gesso no perfil do solo, promove a movimentação de cátions, como o Mg ao longo do perfil do solo, favorecendo o aumento dos teores desse nutriente no subsolo

(Brasil et al., 2020). Esse processo ocorre devido ao enxofre presente na molécula de gesso formar um composto estável (MgSO_4), que apresenta grande movimentação no perfil do solo (Raij 2011; Mosharrof et al. 2021), fazendo com que esteja mais disponível na solução do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (1998), que verificaram maior tendência de movimentação do Mg^{2+} em profundidade (30-40 cm), em razão de maiores quantidades de gesso (CaSO_4) aplicadas. Macana et al. (2023) constatou, ao trabalhar com plantas de eucalipto, resultados quatro vezes superiores na concentração de Mg^{2+} no tratamento de uso combinado de gesso e calcário.

A concentração de enxofre (S) aumentou de acordo com a elevação das doses de gesso, alcançando um valor de $12,46 \text{ mg dm}^{-3}$ na dose de 500 kg ha^{-1} de gesso (Figura 3 D). Esse valor representa um incremento de 6,8% em relação ao tratamento controle, correspondendo a um acréscimo de 120% quando comparado ao tratamento controle (Figura 3D). Esse resultado pode ser justificado devido a formulação do gesso, que contém o íon SO_4^{2-} , resultando em maior disponibilidade desse nutriente na solução do solo, como observado no presente estudo em um perfil de solo de 80cm.

Esses resultados estão em concordância com Moda et al. (2013), que também relatam elevadas concentrações de S em até 60 cm de profundidade em um solo tratado com gesso agrícola. Elevadas concentrações de S em camadas mais profundas do solo ocorrem devido à alta mobilidade do sulfato que forma um par iônico neutro com o íon Ca (RAIJ, 2008; SORATTO e CRUSCIOL, 2008). Além disso, a taxa de mineralização da matéria orgânica é reduzida em períodos secos, o que limita a disponibilidade de S a partir dessa fonte natural. Nesses casos, o SO_4^{2-} proveniente da constituição do gesso pode ser uma fonte alternativa de S para as plantas nessas situações (Tiecher et al., 2018).

A Saturação por bases (V%) e Saturação por Alumínio (m%) apresentaram resultados significativos (Figura 3E e 3F). O tratamento que recebeu 500 kg ha^{-1} apresentou um aumento na saturação por bases e redução na saturação por alumínio, com valores de 38,75 e 10,74%, respectivamente (Figura 3E e 3F). A saturação por bases é um indicador importante de fertilidade do solo (Santos et al., 2018; Silva et al., 2020) e é facilmente influenciada pela concentração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , além dos teores de alumínio trocável do solo (Novais et al., 2007; Sousa et al., 2020). Neste estudo os níveis de K^+ e Mg^{2+} foram expressivos, apresentando teores de $1,02 \text{ mmol dcm}^{-3}$ e $0,8 \text{ mmol dcm}^{-3}$, respectivamente, no tratamento com 500 kg ha^{-1} de gesso. Assim, pode-se inferir que o uso combinado de gesso e calcário influenciou significativamente o aumento dos teores desses elementos no perfil do solo analisado.

O alumínio é o principal elemento associado aos efeitos negativos da acidez do solo sobre as plantas (RAIJ, 2008), influenciando o elevado nível de acidez potencial e alumínio trocável, o que gera um ambiente ácido, que pode prejudicar o desenvolvimento radicular e conseqüentemente, a redução na absorção de nutrientes, limitando o desenvolvimento e produção vegetal (Ramos et al., 2013; Ernani, 2017; Taiz; Zeiger, 2009; Pauletti et al., 2014). O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apresenta maior capacidade de se deslocar para camadas mais profundas do solo, gerando um aumento de bases trocáveis e redução do Al^{3+} nos complexos de troca, neutralizando o excesso de alumínio (Zoca; Penn, 2017). Os resultados obtidos neste estudo corroboram com Ernani (2016) que afirma que pode reduzir a toxidez do Al de várias formas: pelo aumento de Ca na solução do solo, diminuindo a atividade do Al, pela competição do Ca pelos sítios de absorção nas raízes e/ou permitindo a formação de par iônico não tóxico às plantas (AlSO_4^+).

Índice de qualidade química do solo

O tratamento que recebeu gesso na quantidade de 500 kg ha^{-1} também apresentou os melhores resultados no índice de qualidade do solo (Figura 4 A). Após a avaliação dos autovalores maiores do que 1 gerou-se dois grupos de fatores: F1, contendo as variáveis Mg, V% e m% (Figura 4B) e F2, contendo as variáveis P, K e S (Figura 4C). Embora, o IQS e os fatores tenham apresentado efeito significativo, somente o PC2 apresentou o R^2 maior que 0,71.

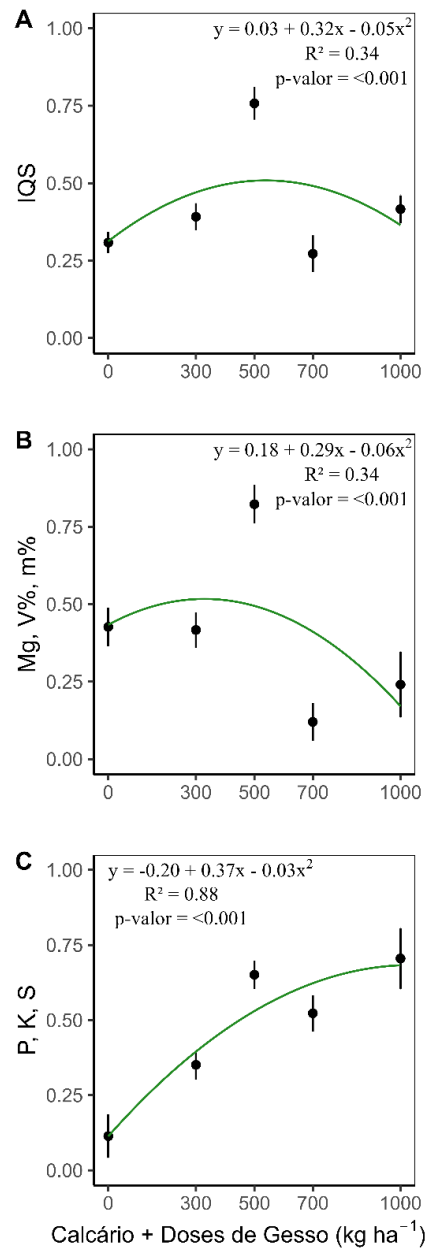


Figura 4: Índice de Qualidade do solo (IQS) e os dois grupos de fatores formados com os atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico em função da aplicação de gesso e os dois grupos de fatores formados. Fósforo (P), saturação por alumínio (m), potássio (K), enxofre (S), magnésio (Mg), saturação por bases (V).

Os atributos químicos do solo tiveram um forte aumento devido à adição de gesso e calcário, no entanto, a dose de 500 kg ha⁻¹ de gesso foi a que apresentou maior pontuação no índice de qualidade do solo (Figura 2A). Isso pode ser confirmado com o comportamento do F2 (P, K, S) (Figura 4C). O incremento destes nutrientes no solo apresenta efeito positivo na fertilidade, pois são essenciais para o desenvolvimento das culturas (Novais et al., 2007), e equilíbrio da dinâmica bioquímica do solo, que está ligado a decomposição de materiais orgânicos e ciclagem dos nutrientes (Moreira; Siqueira, 2006; Bettioli et al., 2023). Contudo, observa-se que com doses de gesso acima de 617 kg ha⁻¹ houve diminuição dessas variáveis químicas no solo, mostrando a redução do potencial de qualidade do solo. Dessa forma, é

evidente que doses elevadas de gesso podem se tornar prejudiciais para o equilíbrio da qualidade do solo no decorrer de 12 meses após sua aplicação.

O P é um elemento limitante no crescimento e desenvolvimento de toda a flora e também é imprescindível para o crescimento de microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica (Cordell et al., 2014), além de ser constituinte de nucleotídeos e transportadores de energia metabólica, tendo como função principal a participação em moléculas orgânicas responsáveis pela informação genética (Marschner, 2012; Pereira, 2019).

O K é um nutriente exigido em grande quantidade pelas plantas, sua maior disponibilidade ocorre com o aumento do pH e redução de óxidos de ferro e alumínio, devido ao maior número de cargas nos coloides para a ligação deste nutriente (Meurer, 2010; Fernandes, 2018). Apresenta papel fundamental na abertura e fechamento estomático, manutenção do turgor das células, além de controlar a absorção de água e translocação de outros nutrientes no interior da planta (Malavolta, 2006; Sara; Hajiboland, 2017).

A disponibilidade de S é influenciada por fatores de textura do solo, onde solos com maior presença de areia tendem apresentar menores quantidades do nutriente (Alvarez et al., 2007; Fiorini et al., 2016), além do que, em solos com elevados teores de óxidos de ferro e alumínio ocorre maior adsorção do enxofre, diminuindo a disponibilidade do nutriente (Hartemink; Barrow, 2023; Bolan et al., 2003). Uma das alternativas para mitigar esses problemas é a adição de gesso que irá reduzir o efeito tóxico do alumínio e disponibilizar S para o solo (Bennett et al., 2014; Soratto et al., 2008; Costa et al., 2020).

Sendo assim, a utilização conjunta de gesso e calcário é uma prática agrícola positiva devido os efeitos causados nos atributos químicos do solo, e conseqüentemente no desenvolvimento de raízes e parte aérea das plantas, pois o uso de gesso influencia na redução do alumínio tóxico do solo, promovendo melhor desenvolvimento radicular resultando no melhor desempenho na absorção de nutrientes presentes na solução do solo (Tiecher et al., 2018; Fois et al., 2018; Fontoura et al., 2019; Brasil et al., 2020). Portanto, afirma-se que a aplicação de gesso, com destaque para a dose de 500 kg ha⁻¹, promoveu melhorias significativas nos atributos químicos do solo, resultando em maior disponibilidade de nutrientes essenciais como P, K e S, além de reduzir a toxidez do alumínio, proporcionando condições mais favoráveis para o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes pelas plantas.

A avaliação final do IQS foi limitada às classes utilizadas por Melo Filho et al. (2007): IQS < 0,50 (ruim), IQS entre 0,50 a 0,70 (média), e IQS > 0,71 (ótima). Assim, observou-se

que o tratamento que recebeu 500 kg ha^{-1} gesso se enquadra na categoria de ótima qualidade química do solo, apresentando valores de 0,76. Esta concentração de gesso no solo tende a gerar uma equivalência entre os atributos químicos do solo e indicam que o cultivo de coqueiro quando adicionado gesso no solo, pode proporcionar altos índices de qualidade do solo, conseqüentemente maior produção e produtividade da cultura.

Mapa de calor

O gráfico do mapa de calor usando análise de cluster multivariada e distância euclidiana como método métrico de distância entre os grupos (Figura 5) indica a presença de quatro clusters (grupos I, II, III e IV) significativos com a distinção entre os tratamentos aplicados. Além disso, a escala de cores no mapa de calor evidencia em qual tratamento os atributos químicos do solo são mais ou menos expressivos (Figura 5).

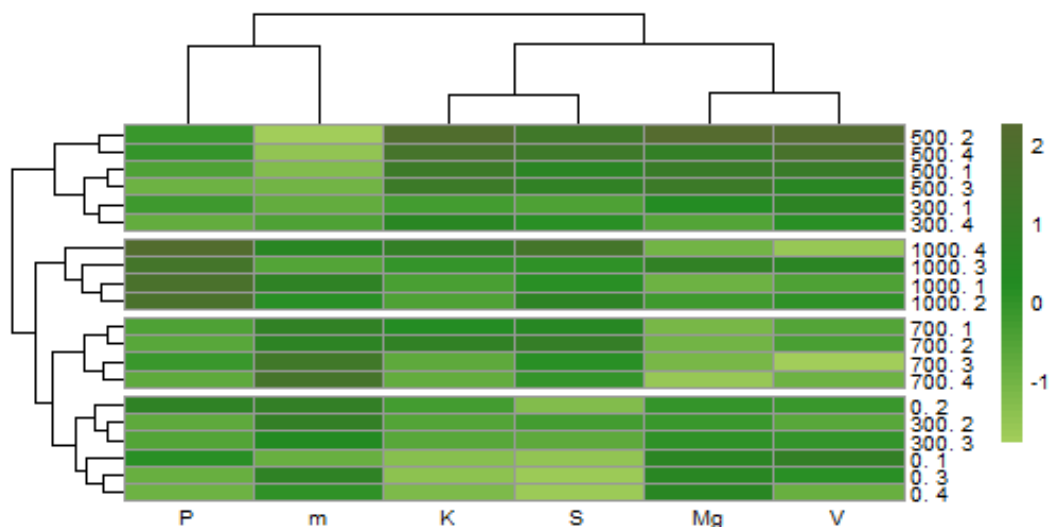


Figura 5: Gráfico de mapa de calor com propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico submetidos a aplicação superficial de gesso agrícola. O dendrograma acima do mapa de calor representa os agrupamentos com base em padrões semelhantes de variação. Fosforo (P), saturação por alumínio (m), potássio (K), enxofre (S), magnésio (Mg), saturação por bases (V), em função das doses de gesso aplicados.

Na interpretação da matriz de similaridade entre as áreas, foi admitido um corte na distância euclidiana de setenta e oito, o que permite uma divisão clara de 04 (quatro) grupos ordenados por meio do conjunto dos atributos químicos. O grupo I pode ser dividido em Ia e Ib, englobando o tratamento que não recebeu gesso e o tratamento que recebeu 300 kg ha^{-1} de gesso. O grupo II é representado pelo tratamento que recebeu 700 kg ha^{-1} de gesso. O grupo 3 é composto pelo tratamento que recebeu 1000 kg ha^{-1} de gesso. O grupo IV pode ser dividido

em Ia e Ib, englobando o tratamento recebeu 300 kg ha⁻¹ de gesso e 500 kg ha⁻¹ de gesso.

O fósforo (P) foi mais evidente no grupo III, referente ao tratamento que recebeu maior concentração de gesso (1000 kg ha⁻¹), o que sugere que a maior disponibilidade de P está associada à menor concentração de Al⁺³ no solo. Esse efeito é atribuído ao uso do gesso, que auxilia na melhoria do perfil do solo, neutralizando o alumínio tóxico presente em camadas profundas e tornando a absorção de fósforo mais eficiente (Pantano et al., 2016; Tiecher et al., 2023), uma vez que, o uso de gesso agrícola promove melhor desenvolvimento radicular de plantas jovens de coqueiro (Gomes et al., 2024). Além de favorecer melhor absorção de P pelas plantas, visto que se trata de um nutriente de baixa mobilidade no solo e que é absorvido quando as raízes entram em contato com nutriente presente na solução do solo (Vinha et al., 2021; Pereira et al., 2021; Alovisi et al., 2020; Barbosa et al., 2022).

A variável de saturação por alumínio (m%), apresentou menor associação com o grupo I, composto pelos tratamentos que receberam 300 e 500 kg ha⁻¹ de gesso, que apresentaram comportamentos similares por pertencerem ao mesmo grupo. Essa similaridade pode ser explicada pela presença de gesso em quantidades adequadas para o desenvolvimento de plantas de coqueiro cultivados em Neossolo quartzarênico. Esses resultados podem ser justificados pelo fato de o gesso atuar no solo como potencializador da calagem, agindo nas camadas mais subsuperficiais do solo, reduzindo a quantidade de alumínio, diminuindo a ação da acidez potencial e saturação por alumínio (Anderson et al., 2020; Bossolani et al., 2020). Esse processo ocorre por meio de uma reação de troca de ligantes na superfície das partículas de solo, envolvendo óxidos hidratados de ferro e alumínio, com o SO₄²⁻ deslocando OH⁻ e, assim, promovendo neutralização parcial da acidez (Fontoura et al., 2019; Zaccaron et al., 2019).

As variáveis K, S, Mg e V% apresentaram maior associação com o grupo I, composto pelos tratamentos que receberam 300 e 500 kg ha⁻¹ de gesso. Esses tratamentos demonstram comportamentos similares, mas o tratamento que recebeu 500 kg ha⁻¹ de gesso foi o que apresentou melhor correlação com as variáveis.

CONCLUSÃO

A aplicação de 500 kg ha⁻¹ foi a dose que proporcionou melhor qualidade química de um Neossolo Quartzarênico cultivado com plantas jovens de coqueiro, assim como maiores níveis de variáveis individuais (K, Mg e S), com incremento de 192% de potássio, 19,55% de magnésio e 6,8% de enxofre, quando comparados ao tratamento controle (somente com calcário agrícola). A adição de gesso reduziu a saturação por alumínio, bem como a aplicação

em dose adequada deste, otimizou a mobilidade de nutrientes no perfil do solo, contribuindo para uma maior disponibilidade de nutrientes nas camadas mais profundas do solo.

REFERÊNCIAS:

- Alovisi, A. M. T; Cassol, T. J; Nascimento, J. S . et.al. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, v. 22, 7p. 2020. 10.1016/j.geodrs.2020.e00298.
- Alvarez-V, V. H.; Roscoe, R.; Kurihara, C. H.; Pereira, N. F.; Enxofre. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-646.
- Araújo, E. A.; Ker, J. C.; Neves, J. C. L. Lani, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava-PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012. 10.5777/PAeT.V5. N1.12.
- Barbosa, J. Z; Poggere. G; Mancini. M.. et al. National-scale spatial variations of soil phosphorus retention capacity in Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.128, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103271>
- Bayer, C., Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. *Soil Tillage Res* 193, 27–41. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.005>.
- Bennett, J.McL, Greene, R.S.B., Murphy, B.W., Hocking, P. & Tongway, D. 2014. Influence of lime and gypsum on long-term rehabilitation of a Red Sodosol, in a semi-arid environment of New South Wales. *Soil Research*, 52, 120–128. 10.1071/SR13118.
- Bettiol, W.Silva, C. A.Cerri, C. E. P.Martin Neto, L.Andrade, C. A. De. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 788 p. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153147>.
- Bolan, N.S. & Hedley, M.J. 2003. Role of carbon, nitrogen and sulfur cycles in soil acidification. In: *Handbook of soil acidity* (ed.Z. Rengel), pp. 29–52. Marcel Dekker, New York.
- Bossolani, J. W.; Crusciol, C. A. C.; Merloti, L. F.; Moretti, L. G.; Costa, N. R.; Tsai, S. M.; Kuramae, E. E. A correção de longo prazo de calcário e gesso aumenta a fixação de nitrogênio e diminui a nitrificação e a desnitrificação da abundância do gene na rizosfera e no solo em um sistema de consórcio de plantio direto tropical. *Geoderma*, v.375, 2020.
- Brady, N. C; Weil, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p

- Brasil, E. C.; Cravo, M. S.; Viegas, I. J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. Embrapa, 2. ed., p. 133-145. Brasília, 2020.
- Caires E. F.; Guimarães A. M. Recomendação de gesso para solos sob plantio direto da região sul do Brasil. Anais do Fertilizante, p. 486-486, 2016.
- Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araujo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- Cordell, D.; White, S. Life's Bottleneck: Sustaining the world's phosphorus for a food secure future. *Ann. Rev. Environ. Resour.* 2014, 39, 161–168. 10.1146/annurev-environ-010213-11330
- Costa, B. P.; Júnior, J. B.D; Rego, C. A, R. De M. et al. uso do calcário e do gesso agrícola em duas épocas de implantação do coffee arabica. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, [S. l.]*, v. 10, n. 1, p. 241–247, 2020. DOI: 10.21206/rbas.v10i1.9940. <https://doi.org/10.21206/rbas.v10i1.9940>
- Crusciol, C.A.C., et al. Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 115, 1–26. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10017-0>
- Ernani, P. R. Química do solo e disponibilidade de nutrientes. Lages, 2016, 254p.
- Fernandes, M. S., Souza. S. R., Santos. L.A., Nutrição mineral de plantas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-2. Ed- Viçosa, MG, 2018.
- Fiorini, I. V. A.; Pinho, R. G. V.; Pires, L. P. M.; Santos, À. O.; Fiorini, F. V. A.; Cancellier, L. L.; Resende, E. L. Avaliação de fontes de enxofre e das formas de micronutrientes revestindo o NPK na cultura do milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 15, n. 1, p. 20-29, 2016. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p20-29>
- Fois, D. A. F.; Lana, M. C.; Alvarez, J. W. R.; Frandoloso, J.; Vera, L. R. Q.; Tiecher, T. Resposta da Soja ao Gesso Agrícola em Plantio Direto no Paraguai. *Revista Ceres*, v. 65, n.5, p. 450-462, 2018. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865050010>
- Fontoura, S. M. V; Pias, O.H. De C.. et al. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. *Soil & Tillage Research*, v. 193, p. 27-41, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.005>
- Gomes, M. S., Araújo, S. R., Silva Júnior, M. L. D., Lins, P. M. P., Moraes, A. R. A. D., & Gomes, M. F. (2024). Aplicações de gesso e calcário melhoram a fertilidade do solo sob cultivo de coco na Amazônia Oriental, Brasil. *Ciência e Agrotecnologia*, 48, e017423. 10.1590/1413-7054202448017423
- Gondim, J.E.F., Souza, T., Portela, J.C., Santos, D., Nascimento, G.D.S., da Silva, L.J.R., 2023. Soil Physical-chemical Traits and Soil Quality Index in a Tropical Cambisol as

Influenced by Land Uses and Soil Depth at Apodi Plateau. Northeastern Brazil. *Int J Plant Prod* 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00256-1>

Hartemink, A.E.; Barrow, N.J. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*. 2023. DOI: 10.1007/s11104-022-05861-z.

Larson, W. E., & Pierce, F. J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai, Thailand, 15-21 September 1991. [Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991], 175-203.

Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 631 p.

Marschner, P. Marchner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd ed.; Elsevier Ltd.: London, UK, 2012; p. 649. 13.

Melo Filho, J. F. de. et al Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 06, p. 1599-1608, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600036>

Meurer, E.J., Fundamentos de Química do Solo. 4a Ed. Porto Alegre, RS: Evangraf, 2010.v.1.264p.

Moreira F.M.S., Siqueira J.O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. 2.ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

Mosharrof, M.; Uddin, M.K.; Sulaiman, M.F.; Mia, S.; Shamsuzzaman, S.M.; Haque, A.N.A. Combined Application of Biochar and Lime Increases Maize Yield and Accelerates Carbon Loss from an Acidic Soil. *Agronomy* 2021, 11, 1313. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071313>

Novais, R. F. et al. (2007). Fertilidade do solo Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1017p;

Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

Oliveira Silva, M. De; Veloso, C. L.; Nascimento, D. L. Do; Oliveira, J. De; Pereira, D. De F.; Silva Costa, K. D. da. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo / Chemical and physical indicators of soil quality. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 6, n. 7, p. 47838–47855, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-431

Oliveira, R. J., Silva, R. C. D. da, Júnior, G. S. da S., Muniz, P. H. P. C., & Pelá, A. (2020). Oxidação de enxofre elementar em diferentes fontes e doses de fertilizantes / Elementary sulfur oxidation in different sources and doses of fertilizers. *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 27735–27745. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-282>

Pantano, G.; Grosseli.G.M; Mozeto. A. A. et al. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma

- questão de segurança hídrica e alimentar. *Química Nova*, v. 39, n.6, p.732-740, 2016. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160086>.
- Pauletti, V. De Pierri. L; Ranzan. T. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200014>
- Penn, C.J.; Camberato, J.J. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. *Agriculture* 2019, 9, 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
- Pereira AM, Coimbra S. Advances in plant reproduction: from gametes to seeds. *J Exp Bot.* 2019 Jun 1;70(11):2933-2936. doi: 10.1093/jxb/erz227. Erratum in: *J Exp Bot.* 2020 Oct 22;71(20):6697. 10.1093/jxb/eraa362.
- Pereira, D. S; Da Costa, Y. K. S; Carvalho. L. B. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. *Revista Agronomia Brasileira*, São Paulo, v. 5, p. 1-4, 2021. 10.29372/rab202124.
- Pinto, F. A; De Souza, E. D; Paulino. H. B. et al. P-sorption and desorption in savanna brazilian soils as a support for phosphorus fertilizer management. *Ciência e Agrotecnologia*, v.37, n.6, p.521-530, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542013000600005>
- Pivetta, L. A. Et Al. Gypsum application, soil fertility and cotton root growth. *Bragantia*, v. 78, n. 2, p. 264–273, 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20180183>
- Raij, B. Uso do gesso agrícola na agricultura. *Informações Agronômicas*, 117. Piracicaba: POTAFOS, p.14-15, 2007.
- Raij, B.V. et al. 2011. *Análise química para avaliação da fertilidade de solo tropicais*. Campinas: IAC.
- Ramos, B. Z; Toledo, J. P. V. F; De Lima, J. M; Serafim, M. E et al. Doses de gesso em cafeeiro: Influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um latossolo vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400019>
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araujo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- Sara Bahrami-Rad, Roghieh Hajiboland. Effect of potassium application in drought-stressed tobacco (*Nicotiana rustica* L.) plants: Comparison of root with foliar application, *Annals of Agricultural Sciences*, Volume 62, Issue 2, 2017, P. 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2017.08.001>
- Silva GF, Santos D, Silva AP, Souza JM. Indicadores de qualidade do solo só diferentes sistemas de uso na mesorregião do Agreste Paraibano. *Revista Caatinga*. 2015; 28 (3): 25-35. ISSN 1983-2125. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n303rc>

- Singer, M.J., Sojka, R.E., 2002. Soil quality. In: Sumner, M.E. (Ed.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Soratto, R.; Crusciol, C.A. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 32, p. 675-688, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200022>
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009, 819 p.
- Sousa, M. A. De; Reis, I. M. S.; Almada, A. P. De; Rossi, C. Q.; Pereira, M. G.; Pinto, L. A. R. Da S.; Silva, C. F. Da; Santos, O. A. Q. Dos. Atributos químicos e frações da matéria orgânica em solos antrópicos na Amazônia Oriental / Chemical attributes and fractions of organic matter in anthropic soils in the Eastern Amazon. *Brazilian Journal of Development, [S. l.]*, v. 6, n. 5, p. 29623–29643, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-424.
- Tal, A. (2018). Making conventional agriculture environmentally friendly: moving beyond the glorification of organic agriculture and the demonization of conventional agriculture. *Sustainability*, 10(4), Article 1078.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. *Manual de métodos de análise de solo*. 3.ed. Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574p.
- Tiecher, T. et al. Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. *Geoderma*, v.435, 2023. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170025>.
- Vasu, D., Singh, S.K., Ray, S.K., Duraisami, V.P., Tiwary, P., Chandran, P., Anantwar, S. G., 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semiarid Deccan plateau, India. *Geoderma* 282, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>
- Vinha, A. P. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. *Nativa – Pesquisas Agrárias e Ambientais*, Mato Grosso, v.9, n.1, p.30-35, 2021. DOI: 10.31413/nativa.v9i1.10973.
- Vitti, Godofredo Cesar; Priori, Júlio Cesar. Calcário e gesso: os corretivos essenciais ao Plantio Direto. *Fertilidade*. Piracicaba, p. 30-34. ago. 2009.
- Wadt, P. G. S.; Saldanha, E. C. M.; Silva Junior, M. L.; Lins, P. M. P. *Recomendação de Calagem e Adubação na Cultura do Coqueiro (Cocos nucifera) na Amazônia*. 2021.
- Zaccaron, J. B; Arboitte, M. Z. Produção de biomassa e qualidade química de *Panicum maximum* cv. Tanzânia submetidos a doses de gesso agrícola. *Revista de Ciência e Inovação*, v. 4, n. 1, p. 82-93, 2019; DOI:10.26669/2448-4091174
- Zoca, S. M.; Penn, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in .*Advances in Agronomy*. v. 144, p. 1-44, 2017. 10.1016/bs.agron.2017.03.001

Capítulo 3: DINÂMICA DO CARBONO NO SOLO EM CULTIVO DE COQUEIRO ANÃO VERDE SOB APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Resumo

O cultivo do coqueiro é de grande importância para a economia brasileira, gerando renda e fornecendo várias matérias primas. Atualmente, o Brasil tem umas das mais altas produtividades quando comparado a outros países produtores, o estado do Pará é o terceiro maior produtor nacional, no entanto apresenta grandes desafios para o pleno desenvolvimento das plantas. Dentre esses desafios podemos destacar a baixa qualidade do solo em que é cultivado, pois apresenta baixa capacidade de troca catiônica, elevada saturação por alumínio, baixo teor de matéria orgânica, sendo necessário a utilização de fertilizantes químicos, corretivos e condicionantes do solo, o que em longo prazo irá influenciar na microbiota do solo. Sendo assim, objetivou-se com o presente estudo avaliar a dinâmica do carbono em um Neossolo Quartzarênico após aplicação de gesso e calcário sob cultivo de plantas jovens de coqueiro anão. Ao fim do experimento observou diferença estatística ao longo do tempo e em diferentes profundidades do solo analisado. A profundidade de 0-5 cm apresentou melhores resultados, com incremento de carbono orgânico (Corg), carbono da biomassa microbiana (CBM) e carbono oxidável (CPOx). A variável de carbono orgânico do solo foi a que apresentou maiores modificações ao longo do tempo, sendo a mais sensível de todas as variáveis analisadas, com incremento variando de 29,71% a 37,66% na camada 0-5 cm e 37,5% a 58,1% na camada de 5-10 cm, quando comparados com as amostragens antes da aplicação de gesso e calcário.

Palavras chave: Biologia do solo, carbono orgânico, *cocos nucifera* L., Neossolo Quartzarênico, análise temporal

Abstract

The cultivation of coconut trees is of great importance to the Brazilian economy, generating income and providing various raw materials. Currently, Brazil has one of the highest yields when compared to other producing countries, the state of Pará is the third largest national producer, however it presents great challenges for the full development of plants, among these challenges we can highlight the quality of the soil in which it is cultivated, which has low cation exchange capacity, high saturation by aluminum, low organic matter content, requiring the use of chemical fertilizers, correctives and soil conditioners, which in the long term will influence the soil microbiota. Thus, the objective of this study was to evaluate the carbon dynamics in a Quartzarenic Neosol after application of gypsum and limestone under cultivation of young dwarf coconut plants. At the end of the experiment, he observed a statistical difference over time and at different depths of the analyzed soil. The depth of 0-5 cm showed better results, with an increase in organic carbon (Corg), microbial biomass carbon (MBC) and oxidizable carbon (DMF). The soil organic carbon variable was the one that presented the greatest changes over time, being the most sensitive of all the variables analyzed, with an increase ranging from 29.71% to 37.66% in the 0-5cm layer and 37.5% to 58.1% in the 5-10cm layer, when compared to the sampling before the application of gypsum and limestone

Keywords: Soil biology, organic carbon, *cocos nucifera* L., Quartzarenic Neosol, temporal analysis.

INTRODUÇÃO

No mercado brasileiro de frutas é notória a importância do cultivo do coqueiro (*Cocos nucifera* L.), uma espécie de alta adaptabilidade às condições edafoclimáticas do Brasil, consolidando-se como uma importante atividade agrícola para economia nacional (Fróes Júnior et al., 2019; Subramanian et al., 2024). O Estado do Pará apresenta grande potencial produtivo devido às condições edafoclimáticas favoráveis e à disponibilidade de áreas para o cultivo (Fontes et al., 2010). No entanto, os produtores locais enfrentam desafios significativos (Lins; Viégas, 2008), dentre eles, a baixa fertilidade natural dos solos (Luizão, 2007).

Em geral, os solos do Estado do Pará apresentam baixos teores de matéria orgânica e baixa capacidade de troca catiônica (Gama et al., 2020). Além disso, alguns desses solos apresentam textura arenosa ou franco arenosa, o que contribui para uma baixa concentração de cálcio e elevada concentração de alumínio nas camadas subsuperficiais, como ocorre nos Neossolos Quartzarênicos (Sousa et al., 2020; Oliveira, 2013; Luizão, 2007).

Embora os Neossolos Quartzarênicos sejam caracterizados com baixa fertilidade natural e pouca capacidade de retenção de água, a maioria dos plantios de coqueiro estão situados nesses solos, devido à adaptabilidade da cultura a solos arenosos (Sobral, 2003). Esses solos são conhecidos por seus depósitos de areia, com textura predominantemente arenosa ao longo de pelo menos 2 metros de profundidade, e com teor de argila inferior a 15% (Kampf et al., 2009; Lepsch, 2010). Devido a essa composição, esses solos são considerados de baixa aptidão agrícola, e seu uso contínuo com culturas anuais pode levá-los rapidamente à degradação (Souza et al., 2006; Reatto et al., 1998).

Assim, é fundamental ressaltar que a adubação e o manejo adequado do solo são de suma importância nas áreas de produção de coqueiro (Srinivasa et al. 2002). Nesse sentido, a utilização de gesso e de calcário é uma alternativa para mitigar problemas relacionados com as condições químicas do ambiente radicular, principalmente devido sua ação sobre o alumínio trocável. Por serem condicionantes dos solos, tanto o gesso como o calcário, apresentam ação nos atributos químicos, físicos e nas atividades bioquímicas do solo (Bayer, 2019; Brasil et al., 2020; Backes et al., 2017).

A biota do solo e as raízes das plantas constituem a fração viva e mais ativa da matéria orgânica do solo (Silva et al., 2023; Oliveira et al., 2016). Os microrganismos edáficos estão diretamente implicados com o funcionamento físico e nutricional do solo e são os responsáveis por todas as transformações biogeoquímicas que nele acontecem (Jansson et al., 2020; Sorensen et al., 2016). Por apresentarem sua maior atividade nas camadas mais

superficiais do solo, sua estrutura e atividade são facilmente modificadas com a antropização ou aplicação demasiada de insumos agrícolas (Lisboa et al., 2012; Ferreira et al., 2017; Matsunaga et al., 2018).

A análise do solo permite a avaliação de indicadores de qualidade para estimar a atividade microbiana do solo, como carbono lábil, substâncias húmicas, respiração microbiana do solo, carbono da biomassa microbiana e quociente metabólico (Freitas et al., 2017; Kaschuk et al., 2009; Kummer et al., 2008). Essa avaliação é crucial para compreender a dinâmica dos processos biológicos, como a decomposição da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes essenciais à fertilidade e ao funcionamento dos ecossistemas terrestres (Marschner et al., 2011).

Assim, objetivou-se com este estudo avaliar se aplicação de gesso e calcário modifica os atributos biológicos do solo ao longo de 16 meses após a aplicação, buscando compreender a dinâmica da atividade microbiológica ao longo do tempo. Para isso, foram avaliados os seguintes atributos do solo: Carbono Orgânico do solo (COS); Carbono da Biomassa Microbiana (CBM); Respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO_2) e Carbono Oxidável (C-PO_x).

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na fazenda reunidas Sococo (1°13'42'' S e 48°02'57'' W) no município de Santa Izabel do Pará e foi implantado em fevereiro de 2020. Para a condução do experimento utilizou-se mudas da variedade anão verde, plantadas com espaçamento de 7,5 x 7,5 x 7,5 metros, formando um triângulo equilátero. Como cultura de cobertura viva do solo, utilizou-se a leguminosa *Pueraria phaseoloides* (Roxb) B. Benth entre as linhas de plantio, sendo fonte fixadora biológica de nitrogênio. O clima da região é tropical úmido do tipo Am segundo a classificação de Köppen e Geiger, com temperatura média mensal de 25°C.

O solo da área do experimento foi caracterizado como Neossolo Quartzarênico distrófico segundo Brasil et al. (2020). Para caracterização da área antes da aplicação dos tratamentos foram coletadas amostras de solos em duas profundidades (0-5 e 5-10 cm) que apresentaram características bioquímicas e granulométricas demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1. Características biológicas, químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico antes da instalação do experimento, nas camadas 0-5 e 5-10cm.

PROF	CBM	RB	CPOX	qCO ₂	PROF	Areia	Silte	Argila			
	C g kg ⁻¹	ug de C-CO ₂ g ⁻¹ dia ⁻¹	mg kg ⁻¹	%		-----g kg ⁻¹ -----					
0-5	0,9	107,8	612,4	8,7	0-5	829	78	93			
5-10	1	100,2	666,9	10,1	5-10	842	77	81			
PROF	pH (CaCl ₂)	M O	COrg	P	K	Ca	Mg	Al	CTC	V%	m%
		-----mg dm ⁻³ -----			-----mmolc dm ⁻³ -----			-----%-----			
0-5	4,2	18,5	10,8	4	0,4	6,8	2	5,8	49,5	19,3	38,5
5-10	4,1	16,8	9,8	3,3	0,3	5,5	1,8	7,3	49,1	16	48,2

Delineamento experimental: O experimento foi conduzido em delineamento experimental blocos inteiramente casualizados (BIC), com 4 blocos experimentais (Figura 1).

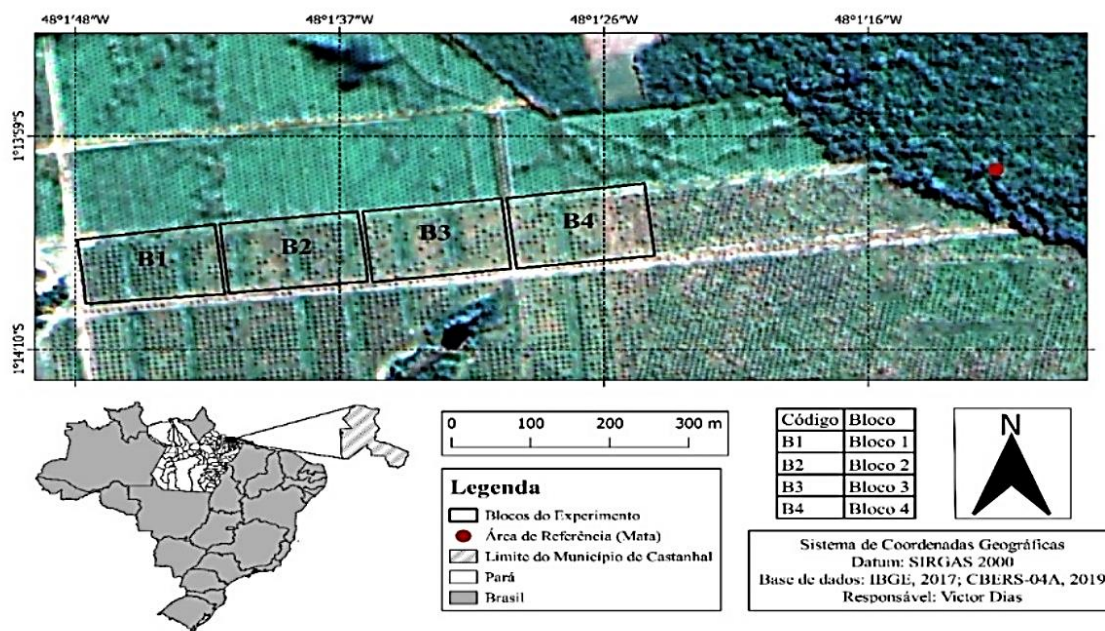


Figura 1: Mapa referente a área experimental

As mudas da variedade anão verde foram transplantadas para o campo experimental em fevereiro de 2020, foram plantadas com o espaçamento de 7,5 x 7,5 x 7,5 metros, formando um triângulo equilátero, cada linha de plantio foi composta por 25 plantas. A adubação de

fundação consistiu na aplicação de 0,3 kg de superfosfato simples (SFS) por planta, adicionados em cova, após esse período, realizou-se adubação com NPK (10-07-10) no ano de 2021. 19 meses após a implantação do experimento foi realizada a aplicação a lanço de calcário dolomítico: (CaO: 36%; PRNT: 91%) em uma concentração de 2000 kg ha⁻¹ e gesso: (Ca: 16%; S: 15%) em uma concentração de 500 kg ha⁻¹. Os tratamentos consistiram em coletas de solo em diferentes períodos do ano de 2022 a 2023, sendo eles: T0: antes da aplicação de gesso e calcário; T1: 4 meses após aplicação de gesso e calcário (janeiro/2022); T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário (maio/ 2022); T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário (setembro/2022) e T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário (janeiro/2023).

O pomar não recebeu nenhum tipo de irrigação específica, contando apenas com as chuvas. Os índices pluviométricos totais anuais do município variam de 1.379,6 mm a 4.709,4 mm, sendo comuns valores em torno de 2.350 mm. A Figura 2 demonstra os valores médios mensais de pluviosidade durante o período de janeiro de 2022 a janeiro de 2023 que apresentou valor total de 4115.6 mm.

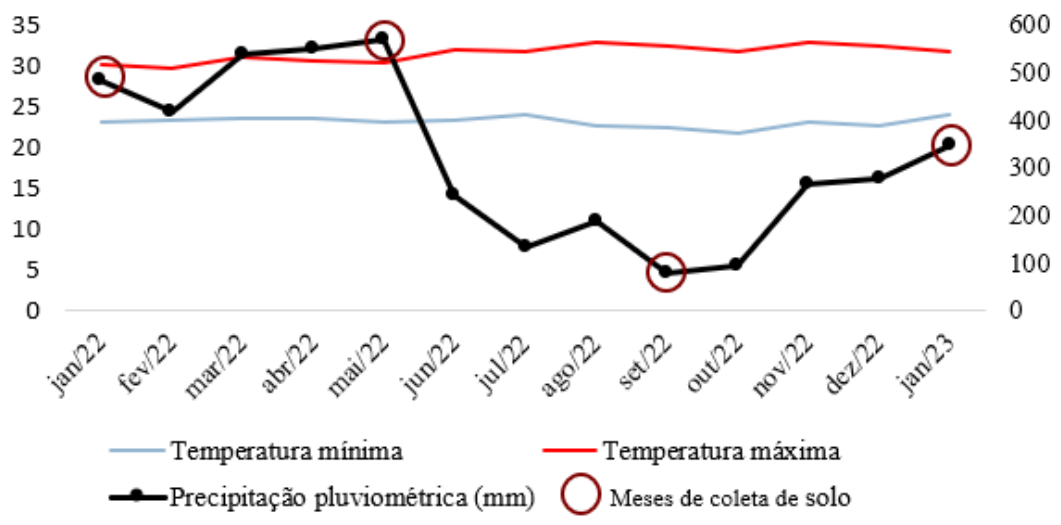


Figura 2: Precipitação mensal, temperaturas e meses de coleta de solo durante o período experimental

Amostragem do solo

Foram realizadas coletas indeformadas de solo cultivado com coqueiro anão em 5 períodos do ano de 2021 a 2023, com intervalo de 4 meses entre coletas, em duas profundidades (0-5 cm e 5-10 cm). Os meses das coletas foram: setembro/ 2021 (coleta inicial), janeiro/ 2022 (primeira coleta após aplicação de gesso), maio/ 2022 (segunda coleta após aplicação de gesso), setembro/ 2022 (terceira coleta após a aplicação de gesso) e

janeiro/2023 (quarta coleta após aplicação de gesso). As amostras deformadas foram coletadas em cada profundidade com 4 repetições, foram combinadas cinco amostras simples para formar uma amostra composta.

Para a determinação dos indicadores microbiológicos, as amostras foram armazenadas em geladeira a fim de controlar a atividade microbiana para que o ambiente se aproxime das condições em campo. Por fim, as amostras passaram por peneira de 2 mm e foram retiradas com auxílio de pinça metálica, raízes e resíduos de origem vegetal ou animal perceptíveis. As amostras para a determinação do carbono oxidável passaram por processo de secagem, destorroamento e peneiramento em peneiras de 2 mm com a finalidade de se obter a TFSA (terra fina seca ao ar).

Indicadores de qualidade do solo

1. Carbono orgânico do solo (CO)

O carbono orgânico foi determinado pelo método Walkley e Black (1934), fundamentado no princípio da volumetria de oxirredução, no qual ocorre a oxidação do C da matéria orgânica à CO_2 e a redução do Cr^{+6} do dicromato de potássio para Cr^{+3} em meio fortemente ácido pela adição de 10 mL de ácido sulfúrico concentrado. Foram utilizados 3 mL de ácido fosfórico P.A. e a difenilamina 1%, como indicador, e, em seguida, realizar a quantificação da redução do Cr excedente através da titulação com sulfato de ferro e amônia na concentração de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$

2. Carbono oxidável do solo (C-POX)

A determinação foi realizada por meio de permanganato de potássio (C-POX) e foi baseada na metodologia de Weil *et al.* (2003) com a utilização de permanganato de potássio como agente oxidante promovendo a oxidação de formas lábeis de carbono no solo o qual foi quantificado por colorimetria, considerando a perda de KMnO_4 à medida que o C é oxidado. Foi realizada a construção da curva para leitura usando a mesma solução de KMnO_4 do preparo das amostras retirando alíquotas para gerar diferentes concentrações. Em seguida, as amostras diluídas foram determinadas a absorvância a 550 nm no espectrofotômetro *Bel UV-M51 UV-Visível - 190 a 1.000 nm*. A mudança nas concentrações de KMnO_4 foi utilizada para estimar o total de C oxidado.

3. Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS)

O método empregado para determinar o carbono da biomassa microbiana foi o de extração-irradiação, conforme sugerido por Ferreira (1999). Esse método utiliza energia eletromagnética de micro-ondas para liberar o carbono dos microrganismos presentes no solo. Posteriormente, realiza-se uma volumetria de oxirredução, utilizando dicromato de potássio, seguida de titulação com sulfato de ferro e amônia. Para o cálculo do CBM, os teores de C das amostras irradiadas foram subtraídos dos valores das amostras não-irradiadas, sendo a diferença dividida pelo valor $k_c=0,33$. Conforme as equações abaixo:

$$CINI = \frac{[(V_b - V_{am}) \cdot (\text{molaridade do sulfato ferroso}) \cdot (3) \cdot (1000) \cdot (\text{volume do extrator})]}{(\text{volume do extrator}) \cdot (\text{peso do solo})}$$

Onde:

V_b = volume do branco em ml;

V_{am} = volume de solução titulante consumido na amostra;

3 = resultado da relação entre o número de mols;

1000 = fator de conversão da unidade.

$$CBM = (CI - CNI) / KC$$

Onde:

CBM = carbono da biomassa microbiana;

CI = amostras irradiadas;

CNI = amostras não irradiadas;

KC = 0,33 (valor de referência).

4. Quociente microbiano (qMIC)

O cálculo para determinação do quociente microbiano foi realizado pela relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico, utilizando a metodologia adaptada de Anderson e Domsch (1993).

5. Respiração Basal do Solo (RBS)

Foi quantificada conforme o método proposto por Gregorich et al. (1990). A

determinação realizou-se através da estimativa da quantidade de CO liberada pelos microrganismos incubados ao longo de um período de 10 dias (Jenkinson e Powlson, 1976) em ambiente desprovido de iluminação, utilizando potes hermeticamente fechados.

A respiração do solo foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\text{mgCO}_2/\text{g de solo} = [(B-T) \cdot N \cdot f \cdot V] / A_t$$

Onde:

B = ml da titulação da prova em branco;

T = ml da titulação da amostra;

N = normalidade do ácido (0,5);

F = fator de correção do HCl 0,5M;

V = ml de NaOH 0,5M usado na captura de CO₂ (10ml);

A_t = ml da alíquota a ser titulada (4ml);

6. Quociente metabólico (qCO₂)

Foi determinado pela relação entre a taxa de respiração basal dos microrganismos do solo e o carbono da biomassa microbiana, seguindo a metodologia sugerida por Anderson e Domsch (1993).

Análises estatísticas

As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o Software R, versão 4.4.0. R Core Team (2024). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Inicialmente, para verificar os pressupostos da análise de variância, foram realizados os testes de normalidade de Shapiro-Wilk e o teste de homocedasticidade de Bartlett. Posteriormente, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) e, para a comparação das médias, foi aplicado o Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de 500 kg ha⁻¹ de gesso associado a 2000 kg ha⁻¹ de calcário proporcionou

mudanças significativas nas propriedades biológicas do solo, apresentando diferença estatística entre os períodos de coletas nas duas profundidades analisadas. Das variáveis analisadas, houve efeito significativo para o carbono da biomassa microbiana (CBM), carbono orgânico do solo (Corg), quociente metabólico (qCO_2), e carbono oxidável (CPOX). Quociente microbiano (qMIC) e Respiração basal (RB) não foram afetados pelas épocas de coleta, por isso os resultados não são apresentados neste estudo.

Esses resultados corroboram com os de Islam et al. (2022), que ao avaliarem durante quatro anos o impacto do gesso na cobertura do solo e seus indicadores biológicos em plantio direto, obtiveram efeito significativo nas propriedades microbiológicas do solo após aplicações anuais de gesso. Barcelos et al. (2021), ao avaliarem o efeito do calcário, gesso e fertilizante nitrogenado a curto prazo, tiveram efeito na ciclagem da biomassa microbiana e maior teor de carbono orgânico na camada superficial do solo (0-10 cm). Portanto, sugere-se que a aplicação de gesso associado ao calcário neste estudo promoveu alterações significativas nos indicadores biológicos do solo, o que evidencia o potencial do gesso para influenciar positivamente a dinâmica microbiana e qualidade do solo ao longo do tempo.

Carbono orgânico do solo (Corg)

O conteúdo de Corg variou em função dos tempos de coleta nas duas profundidades (Figura 3). Os tempos de coleta T1 e T4 apresentaram maiores concentrações para as duas profundidades analisadas. Na profundidade de 0-5 cm, T1 apresentou concentração de $13,75 \text{ g kg}^{-1}$ ($p < 0,05$), com incremento de 29,71% comparado ao T0. Enquanto T4 apresentou concentração de $14,59 \text{ g kg}^{-1}$ ($p < 0,001$), com incremento de 37,66% em relação ao T0 (Figura 3). Para a profundidade de 5-10 cm, em relação ao T0, T1 apresentou concentração de $14,5 \text{ g kg}^{-1}$ ($p < 0,001$), o que representou incremento de 45%; T4 apresentou concentração de $15,81 \text{ g kg}^{-1}$ ($p < 0,001$), com incremento de 58,1%; e T3 apresentou concentração de $13,75 \text{ g kg}^{-1}$ ($p < 0,001$), com incremento de 37,5%, quando comparados com o T0. O tratamento T2 não apresentou diferença significativa quando comparado com o T0 (Figura 3).

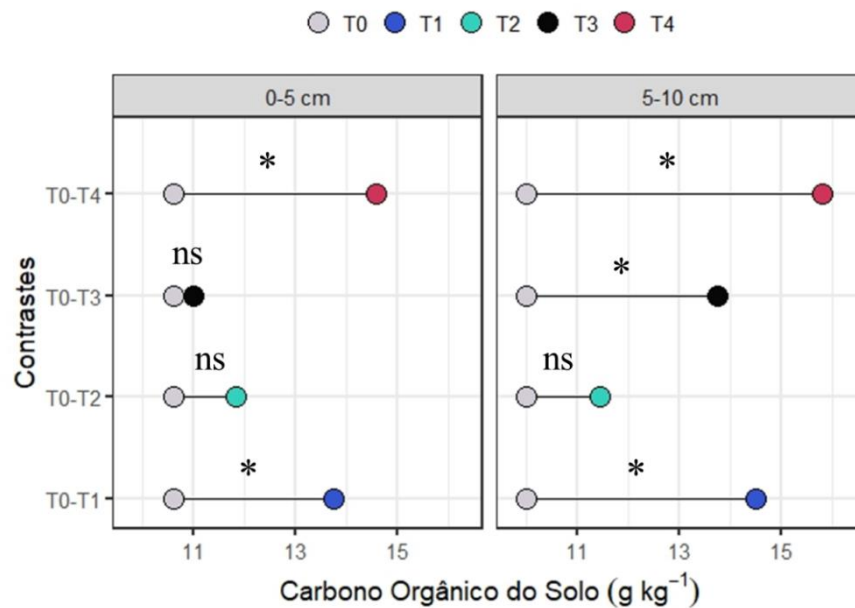


Figura 3: Comparação dos valores de carbono orgânico do solo (Corg) antes e após aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário; T1: 4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. * indica diferença significativa a $p \leq 0,05$, ns indica ausência de significância (Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%).

O armazenamento de carbono orgânico no solo é controlado pela diferença entre as entradas de C derivados de adubos, plantas e animais e os processos de mineralização, erosão e lixiviação do Corg (Lorenz e Lal, 2020). Nesse sentido, há diversas fontes e maneiras de favorecer o aumento das concentrações de carbono orgânico no solo, dentre elas a aplicação de condicionantes (gesso e calcário) e consórcio de espécies. A aplicação de gesso e calcário é reconhecida por melhorar o ambiente edáfico para a atividade de microrganismos e raízes, o que, em função da ciclagem de carbono, contribui para o aumento do teor de carbono do solo (Zhao et al., 2021; Costa et al., 2022;). Embora não tenha sido observado um aumento expressivo nos períodos mais prolongados, nota-se que a aplicação de gesso e calcário apresentou efeito favorável para o incremento de carbono orgânico do solo.

Sugere-se que a cobertura viva (*Pueraria phaseoloides* (Roxb) B. Benth) presente na área de estudo, que apresenta a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico, estimulou o aumento da matéria orgânica no solo melhorando suas propriedades físicas e químicas (Lehman et al., 2015; Sarr et al., 2016). Esse nitrogênio adicional aumenta a disponibilidade de nutrientes para o processo de decomposição de resíduos orgânicos, o que favorece maior formação de matéria orgânica estável. Além disso, essas leguminosas se caracterizam por oferecer cobertura extensa, melhorar a nutrição e a umidade do solo, possuindo caules longos e raízes profundas que formam nódulos em contato com o solo úmido, onde abrigam bactérias

fixadoras de nitrogênio (Hernández et al., 2020). Estudo que avaliou o carbono orgânico constatou que a associação de resíduos vegetais e aplicação de gesso favorecem o aumento nos níveis de carbono orgânico do solo (Walia; Dick. 2023). Logo, esses fatores promovem o acúmulo de biomassa vegetal, tanto acima como abaixo do solo, protegendo, então, o solo da erosão, aumentando o aporte de material orgânico e favorecendo a ciclagem de nutrientes. Sugere-se, também, que o conjunto aplicação de gesso e calcário a cobertura viva favoreceram o aumento das concentrações de Corg.

Além da cobertura viva, Namitha et al. (2022) destacam a importância do coqueiro no sequestro de carbono por ser uma cultura perene que demanda pouco revolvimento do solo e por possuir longo ciclo comercial, sendo capaz de armazenar 24,1 t C ha⁻¹ de carbono. O coqueiro apresenta raízes fasciculadas e profundas que favorecem o aporte de carbono do solo de forma direta e indireta. Diretamente, as raízes podem ser uma fonte de carbono para o solo (de Oliveira et al., 2024) e, indiretamente, melhoram a estrutura física do solo o que, conseqüentemente, cria um ambiente propício para a atividade dos organismos do solo, que por sua vez, acelera a decomposição da matéria orgânica e sua transformação em húmus.

Os maiores valores de Corg na camada de 5-10 cm do solo pode ser justificado pela textura do solo da área de estudo, sendo predominantemente arenoso, composto por 84% de areia. Embora geralmente a concentração de carbono orgânico no solo seja maior nas camadas mais superficiais, até 20 cm de profundidade (Neumann-Cosel et al., 2011; Fontana; Campos, 2017), o Corg é suscetível a lixiviação em solos arenosos devido ao fluxo de água ao longo do perfil (Barnes et al., 2014; Liu et al., 2016). Logo, o elevado teor de areia no solo estudado contribui para a lixiviação do carbono orgânico de camadas mais superficiais para uma camada relativamente mais profunda.

Carbono da biomassa microbiana do solo (CBM)

O conteúdo de CBM apresentou variações discretas em relação aos tempos de coleta na profundidade 0-5 cm (Figura 4). Na profundidade de 0-5 apenas T1 apresentou diferença significativa, com concentração de 89,09 mg kg⁻¹ (p<0,05), valor superior ao tempo zero de coleta (47,27 mg kg⁻¹), assim, T1 apresentou um incremento de 88,47% (Figura 1). Para a profundidade de 5-10 cm não houve efeito significativo para nenhum tempo de coleta quando comparados ao T0 (Figura 4).

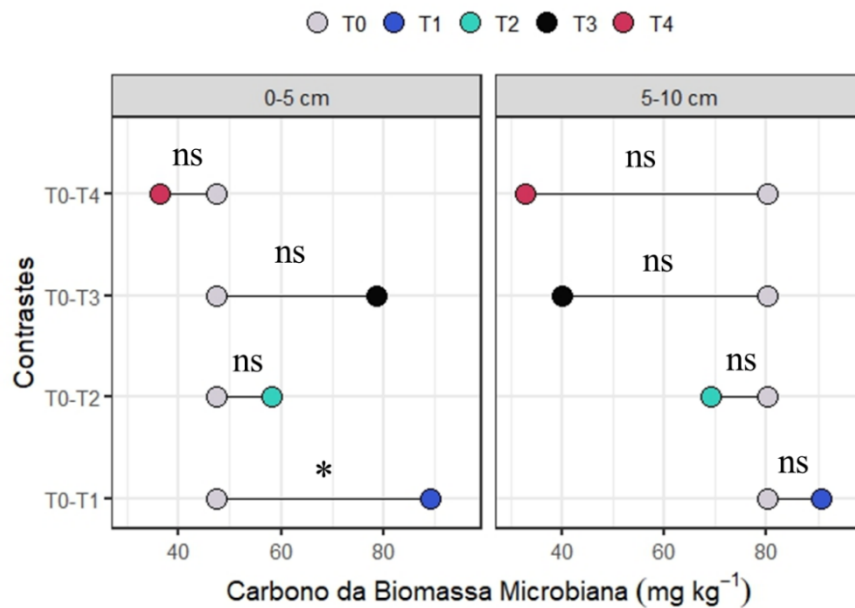


Figura 4: Comparação dos valores de carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) antes e após aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário; T1: 4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. * indica diferença significativa a $p \leq 0,05$, ns indica ausência de significância (Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%).

Os resultados deste estudo corroboram com Gama-Rodrigues et al. (2005) que encontraram diferença estatísticas em diferentes tempos de amostragens em Neossolo Quartzarênico, com concentração de CBM variando entre 43,3 e 95 mg kg⁻¹ na camada superficial do solo. Santos et al. (2004), identificaram valores de 89 mg kg⁻¹ carbono da biomassa microbiana na camada superficial do solo (0-10 cm) ao realizarem estudos em solos arenosos sob sistema de plantio direto e monocultivo com uso de gesso e calcário como preparo de área. Portanto, os valores de CBM estão de acordo com a faixa de variação encontrada na literatura.

O CBM é um indicador sensível às mudanças químicas do solo, alterações ambientais e do sistema manejo adotado (Alves et al., 2011). Nunes et al (2009), ao avaliarem a biomassa microbiana em áreas de monocultivo de café, observaram que CBM varia em função das alterações na umidade do solo, no tipo de sistema e nas épocas de coleta do estudo.

O maior incremento de CBM em T1 na camada 0-5 cm pode ser justificado pelo período de coleta do solo, que foi realizada quatro meses após a aplicação a lanço de gesso agrícola, tempo inicial do processo de solubilização no solo, ocasionando mudanças químicas importantes, tais como: complexação do alumínio tóxico, aumento na saturação por bases e incremento de nutrientes como Ca, K, P e S na solução do solo (Tiecher et al., 2018; Bossolani et al., 2020; Ferreira et al., 2020; Gomes et al., 2024). Portanto, pode-se inferir que

essas mudanças químicas favoreceram a disponibilidade de nutrientes aos microrganismos (Clemente et al., 2017; Costa et al., 2016; Cheng et al., 2020), uma vez que a quantidade de nutrientes disponíveis no solo é um fator determinante para a ocorrência e abundância de microrganismos, o que favorece a concentração de CBM (Hoffmann et al., 2018).

A precipitação pluviométrica neste período auxiliou no processo de solubilização do gesso e calcário no solo, além de proporcionar níveis mais adequados de temperatura e umidade no solo, resultando em melhor estado de equilíbrio ao ecossistema (Matsuoka et al., 2003; Santos et al., 2009). A atividade da biomassa microbiana é afetada por variações microclimáticas do solo, sendo assim, a umidade e o não revolvimento das camadas do solo favorecem as populações fúngicas (Souza et al., 2005; Bakker et al., 2013) que constituem, em termos proporcionais, a maior parte da biomassa microbiana do solo (Alves Reis, 2023; Mendes, 2007; Badejo et al., 2022).

Quociente metabólico (qCO₂)

O conteúdo de qCO₂ apresentou variações significativas no que diz respeito aos tempos de coleta na camada 5-10 cm do solo. O tempo de coleta T4 apresentou maiores concentrações na profundidade de 5-10 cm, apresentando valor de 1,81 com um incremento de 111,64% (p<0,05) comparado com tempo zero de coleta (T0) (Figura 5).

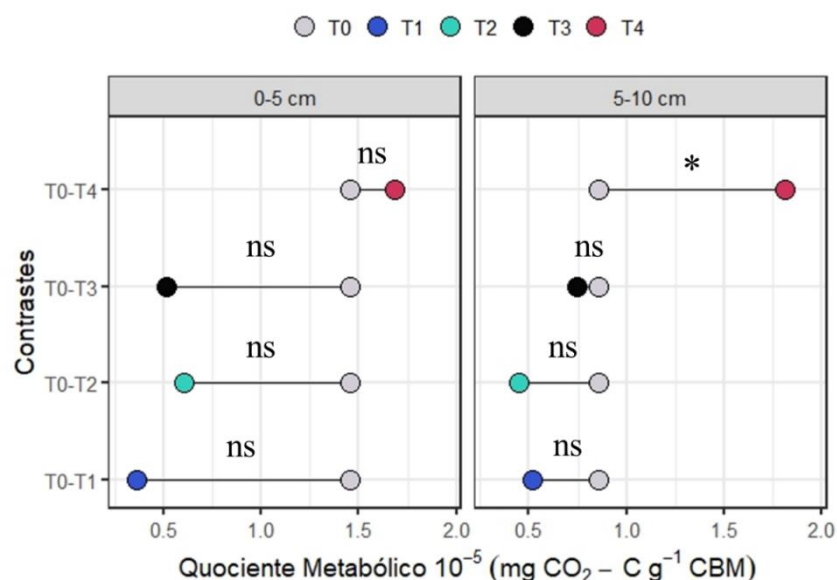


Figura 5: Comparação dos valores quociente metabólico (qCO₂) antes e após aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário; T1: 4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. * indica diferença significativa a p ≤ 0,05, ns indica ausência de significância (Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%). Nota: Os valores de quociente metabólico foram multiplicados por 10⁵ para facilitar a representação gráfica.

Esses resultados corroboram com os de Araújo et al. (2019), que também relataram altos valores de qCO_2 na camada de 10 cm do solo, o que indica condições de estresse da comunidade microbiana do solo, uma vez que uma pequena massa microbiana tem alto consumo de energia para manter a atividade metabólica. Além disso, valores elevados de qCO_2 são observados em condições ambientais adversas, indicando que a biomassa microbiana necessita gastar mais carbono para sua própria manutenção (Mendes et al., 2009). O valor elevado de qCO_2 no tempo de coleta T4 pode indicar estresse ou perturbação. Solos com alto quociente metabólico são dominados por organismos de crescimento rápido, refletindo alta demanda de energia e instabilidade (Dornelles et al., 2017, Marfo et al., 2019), o que pode indicar menor eficiência da biomassa microbiana em incorporar C às suas células, devido à baixa eficiência da conversão de resíduos orgânicos elevando as perdas na forma de CO_2 (Matoso et al., 2012).

Sugere-se que no tempo de coleta T4 o sistema de cultivo analisado apresentou perda de C por lixiviação, uma vez que o solo analisado apresenta textura arenosa. Por ser um período chuvoso, pode ter ocorrido episódios de chuva em abundância na área experimental. Lal et al. (2007), mostram a relação dos estoques de C com a textura do solo, afirmam que solos arenosos tendem a apresentar maior perda de C, segundo estudos realizados por Mercante et al. (2008), perdas de carbono no solo ocorrem principalmente na camada superficial (0-15 cm).

Carbono Oxidável (C-POx)

O conteúdo de C-POx apresentou variações na profundidade 0-5 cm. Os tempos de coleta T1 e T2 apresentaram concentrações estatisticamente maiores na profundidade de 0-5 cm (Figura 6). Em relação aos teores, T2 apresentou o maior valor com $792,77 \text{ mg kg}^{-1}$ ($p < 0,05$), concentração superior quando comparada com o T0, com concentração de $642,84 \text{ mg kg}^{-1}$ ($p < 0,05$), assim, T2 apresentou um incremento de 23,32% (Figura 6). Os demais tratamentos não tiveram efeitos significativos, com valores de 638,65 (T3) e 634,49 (T4) para a camada de 0-5 cm. Para a profundidade de 5-10 cm não houve diferença entre os tempos de coleta analisados (Figura 6).

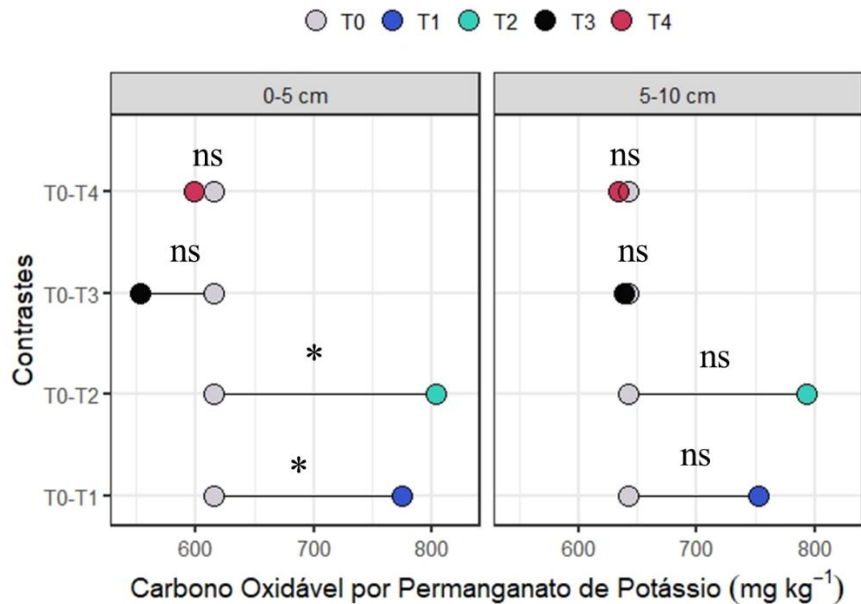


Figura 6: Comparação do Carbono oxidável por permanganato de potássio (C-POx) antes e com diferentes tempos pós aplicação de gesso e calcário em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Cocos nucifera* L. T0: antes da aplicação de gesso e calcário; T1: 4 meses após aplicação de gesso e calcário; T2: 8 meses após aplicação de gesso e calcário; T3: 12 meses após aplicação de gesso e calcário; T4: 16 meses após aplicação de gesso e calcário. *- significativo a $p \leq 0,05$, ns- não significativo. Teste de Dunnett, com nível de significância de 5%

O carbono oxidável por permanganato de potássio (C-POx) é considerado um relevante indicador de qualidade do solo devido a sua elevada sensibilidade ao preparo do solo e práticas de manejos adotados, sendo que a adição de resíduos orgânicos ou cobertura vegetal tendem aumentar o carbono oxidável no solo (Culman et al., 2012; Lal., 2018). Os fatores que controlam o C-POx são os mesmos que controlam o carbono orgânico do solo. Em concordância, a adição de gesso melhora os níveis de C-POx (Inagaki et al., 2007). Além de auxiliar no maior desenvolvimento e maior produção de massa fresca da leguminosa utilizada como cobertura vegetal entre as linhas de plantio de coco na área de estudo analisada (Caires et al., 2018). Dessa forma, pode-se dizer que o período de ação de 4 e 8 meses do gesso e do calcário no solo, resultou no incremento de nutrientes que foram benéficos para a produção do carbono orgânico, refletindo positivamente nos teores de C-POx.

A leguminosa possivelmente proporcionou um maior aporte de matéria orgânica, favorecendo o incremento do C-POx, associado a isso, sugere-se que o não revolvimento do solo durante a aplicação do gesso e do calcário, favoreceu a manutenção dessa fração sobre o solo, aumentando os teores de carbono oxidável (Beutler et al., 2008; Maia et al., 2007; Cereta et al., 2002). Desse modo, o carbono oxidável por permanganato, por ser uma fração do carbono orgânico sensível a mudanças induzidas pelo manejo, pode ser utilizado como indicador de ganho de qualidade do solo de curto prazo (Rovira et al., 2010; Souza et al., 2016).

Embora não tenham sido detectadas muitas diferenças significativas nos atributos biológicos analisados ao longo dos tempos de coleta, esse resultado é positivo, pois indica que houve pouca ou nenhuma perda de carbono após a aplicação de gesso. A manutenção dos níveis de carbono em relação ao tempo inicial sugere que o gesso foi eficiente em manter as condições edáficas favoráveis para preservar o carbono orgânico mesmo em condições de solo arenoso e suscetível à lixiviação. Isso demonstra que a aplicação de gesso pode ser uma prática de manejo viável para conservar o carbono do solo, contribuindo para a sustentabilidade e qualidade dos sistemas agrícolas ao longo do tempo. Contudo, sugere-se a avaliação contínua dos indicadores biológicos do solo, uma vez que o ciclo comercial do coqueiro é longo e esses indicadores podem servir como diretrizes para o manejo do solo.

CONCLUSÕES

Conclui-se que a aplicação de gesso foi especialmente eficaz em promover aumentos no teor de carbono orgânico do solo, com incrementos significativos nas duas camadas avaliadas ao longo do tempo. Esse resultado destaca a sensibilidade do carbono orgânico à aplicação de gesso em relação aos outros indicadores biológicos, evidenciando o potencial dessa prática de manejo para melhorar a qualidade do solo e promover maior concentração de carbono nas camadas superficiais e subsuperficiais.

REFERÊNCIAS

- Alves Reis, D. (2023). Estoques de carbono e biomassa microbiana de um latossolo cultivado com soja sob inoculação fúngica. *Agri-environmental sciences*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.36725/agries.v9i1.8422>
- 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*, Maringá, v. 33, n. 2, 2011. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.4841>
- Anderson, T.H.; Domsch, K.H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environment conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, v.25, p.393- 395, 1993
- Araújo, TS; Gallo, AS; Araújo, FS; Santos, L.C.; Guimarães, NF; Silva, RF Biomassa e atividade microbiana em solo cultivado com milho consorciado com leguminosas de cobertura. *Rev. Agrár.* 2019 , 42 , 347–357. <https://doi.org/10.19084/rca.15433>
- Backes, C; Santos, A. J. M., Rodrigues, L. M., Teodoro, A. G., Ribon, A. A., Villas Bôas, R. L., Pereira, L. M.; Franco, Y. M. Recovery of a dystrophic Red Latosol (Oxisol) and pasture as a function of gypsum in the Cerrado biome. *Revista brasileira de zootecnia*,

v. 46, p. 286-295, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902017000400003>

- Badejo, M.A.; Espindola, J.A.A.; Guerra, J.G.M.; Aquino, A.M. e Correa, M.E.F. (2002) - Soil oribatid mite communities under three species of legumes in an ultisol in Brasil. *Experimental and Applied Acarology*, vol. 27, n. 4, p. 283-296. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023399607317>
- Bakker, Peter Ahm et al. The rhizosphere revisited: root microbiomics. *Frontiers in plant science*, v. 4, p. 165, 2013. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00165>
- Barnes, R. T.; Gallagher, M. E.; Masiello, C. A.; Liu, Z.; Dugan, B. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. *PLoS ONE*, v. 9, n. 9, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108340>
- Bayer, C., Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. *Soil Tillage Res* 193, 27–41. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.005>
- Beutler, S.J.; Loss, A.; Pereira, M.G.; Anjos, L.H.C.; Ferreira, E.P.; Santos, L.L. & Silva, E.M.R. Frações oxidáveis do carbono orgânico cultivado sob manejo orgânico. In: FERTBIO, 2008. Desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental. Londrina, 2008. Anais. Londrina, 2008
- Bossolani, J. W; Crusciol, C. A. C; Merloti; L. F. et al., Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system, *Geoderma*, Volume 375, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>
- Brasil, E. C.; Cravo, M.DA S.; Viégas, I. de J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 419p.
- Briedis, C., et al. (2012). "Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system." *Geoderma* 170: 80-88.
- Caires, E.F., Guimarães, A.M., 2018. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. *Agron. J.* 110 (5), 1987–1995. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.11.0642>.
- Ceretta, C.A.; Basso, C.J.; Herbes, M.G.; Poletto, N. & Silveira, M.J. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. *Ci. Rural*, 32:49-54, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000100009>
- Cheng Y, Zhang H, Chen Z, Wang J, Cai Z, Sun N, Wang S, Zhang J, Chang SX, Xu M, Cai Z, Müller C (2021) Contrasting effects of different pH-raising materials on N₂O emissions in acidic upland soils. *Eur J Soil Sci* 72:432–445. <https://doi.org/10.1111/ejss.12964>
- Clemente, P. R. A.; Bezerra, B. K. L.; Silva, V. S. G. D.; Santos, J. C. M. D.; Endres, L. Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. *Pesquisa*

- Agropecuária Tropical, v. 47, n. 1, p. 110-117, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4742563>
- Costa, C. H. M.; Crusciol, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. *European Journal of Agronomy*, v. 74, p. 119-132, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.001>
- Costa, R.F., Firmano, R.F., Colzato, M., Crusciol, C.A.C., Alleoni, L.R.F., 2022. Sulfur speciation in a tropical soil amended with lime and phosphogypsum under long-term no-tillage system. *Geoderma* 406, 115461. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115461>.
- Culman, S. W.; Snapp. S. de. S; Freeman. M. A; Schipanski. M. E et al. Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal*, 2012. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>
- De Oliveira, R.L.L., Gomes, M.F., Viana-Junior, A.B. *et al.* Oil palm agroforestry systems store more carbon and nitrogen in soil aggregates than monoculture in the Amazon. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 29, 66 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10166-w>
- Dick R.P, Breakwell D.P, Turco R.F (1996) Atividades enzimáticas do solo e medições de biodiversidade como indicadores microbiológicos integrativos. In: Doran JW, Jones AJ (eds) Métodos para avaliar a qualidade do solo. Publicação Especial SSSA N° 49, Madison WI, EUA, pp 247–272.
- Dornelles, H. D. S. et al. Biomassa e atividade microbiana de solos com aplicação de resíduo sólido urbano e dejetos líquidos de suínos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)* n. 44, p. 18-26, 2017. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820170046>.
- Ferreira CF, Bassaco MVM, Pereira M, Pauletti V, Prior S, Motta A (2020) Dendrometric analysis of early development of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* with gypsum use under subtropical conditions. *Floresta Ambient* 27:1–10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.009519>
- Ferreira, A. S.; Camargo, F. A. O.; Vidor, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 4, p. 991-996, 1999.
- Ferreira, E. P. B; Stone, L. F; Martin-Didonet, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. *Rev. Ciênc. Agron.*, v.48, p.22-31, 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170003>
- Fontana, A.; Campos, D. V. B. de. Carbono orgânico. In: Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (Ed.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt. 3, cap. 1, p. 360-367.
- Fontes, H. R.; Maia, F.Z. Cultivo consorciado de coqueiros anões com a leguminosa *Gliricida sepium* L. utilizada como fonte de nitrogênio em neossolo quartzarênico.– Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2021.

- Fróes Júnior, P.S.M.; Aviz, W.L.C.; Rebello, F.K.; Santos, M.A.S. Sources of growth and spatial concentration of coconut crop in the state of Pará, Brazilian Amazon. *Journal of Agricultural Science*, v.11, p.159-168, 2019. <https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/38068>.
- Gama- Rodrigues, E. F; Barros, N. F.; Gama-Rodrigues, A. C.; Santos, G. A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 893-901, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600007>
- Gomes, M. S., Araújo, S. R., Silva Júnior, M. L. D., Lins, P. M. P., Moraes, A. R. A. D., & Gomes, M. F. (2024). Gypsum and lime applications improve soil fertility under coconut cultivation in Eastern Amazon, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 48, e017423. [10.1590/1413-7054202448017423](https://doi.org/10.1590/1413-7054202448017423)
- Gama, J. R. N. F; et al. Solos do estado do Pará. In: *Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará*. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Pt. 1, cap. 1, p. 25-46
- Gregorich, E.G.; Wen, G.; Voroney, R.P.; Kachanoski, R.G. Calibration of rapid direct chloroform extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 22, p. 1009-1011, 1990.
- Hernández, I.; Rosales, P. et al., Aumento no desenvolvimento de Pueraria phaseoloides (Kudzu tropical) devido ao rizóbio ácido tolerante sob condições de acidez e baixa fertilidade, *Cuban. Journal of Agricultural Science*, v. 54, p. 117–128, 2020.
- Hoffmann, R.B.; Moreira, E.E.A.; Hoffmann, G.S.S.; Araújo, N.S.F. Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. *Braz. J. Anim. Environ. Res.* 2018, 1, 168–178. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/738>.
- Inagaki, T, M; Sá, J. C. de M; Caires, E. F; Gonçalves, D. R. P, Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use?, *Science of The Total Environment*, V.599–600,2017,Pages523-532, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.234>.
- Islam KR, Dick WA, Watts DB, Gonzalez JM, Fausey NR, Flanagan DC, et al. (2022) Gypsum, crop rotation, and cover crop impacts on soil organic carbon and biological dynamics in rainfed transitional no-till corn-soybean systems. *PLoS ONE* 17(9): e0275198. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275198>.
- Jansson, J K, Hofmockel, K S, Soil microbiomes and climate change. *Nature Review Microbiology*, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>.
- Jenkinson, D. S.; Powlson, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, v.8, p.209-213, 1976.
- Kampf, N.; Curi, N. & Marques, J.J. intemperismo e ocorrências de minerais no ambiente do solo. in: melo, V.F. & alleoNi, l.r.F., eds. *Química e mineralogia do solo: Conceitos básicos*. Viçosa, mg. sBCs, 2009. Parte 1. p.333-379.

- Kaschuk, G.; Alberton, O.; Hungria, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 42, n. 1, p. 1-13, January, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.020>.
- Kummer, L.; Barros, Y. J.; Schafer, R. F.; Ferreira, A. T. Dos S.; Freitas, M. P.; Paula, R. A. De; Dionísio, J. A. Respiração e biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de uso. *Scientia Agraria*, v. 9, n. 4, p. 559-563, 2008. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99515597022>>
- Lal, R. 2018a. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting SOC sequestration. *Global Change Biology* 24(8). 10.1111/gcb.14054.
- Lehman, R. et al. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. *Sustainability*, v. 7, n. 1, p. 988–1027, 2015. <https://doi.org/10.3390/su7010988>
- Lepsch, I. F. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2º ed. 2010.
- Lins, P.M.P.; Viégas, I.J.M. Adubação do coqueiro no Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2008.
- Lisboa, B. B.; Vargas, L. K.; Silveira, A. O.; Martins, A. F.; Selbach, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.36, p.45-55, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100004>
- Liu, Z.; Dugan, B.; Masiello, C. A.; Barnes, R. T.; Gallagher, M. E.; Gonnermann, H. Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar-sand mixtures. *Journal of Hydrology*, v. 533, p. 461–472, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.007>
- Lorenz K., Lal R. 2022. Soil inorganic carbon stocks in terrestrial biomes. *In Soil organic carbon sequestration in terrestrial biomes of the United States. Edited by Lorenz K., Lal R.* Springer, Cham. pp. 147–173. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95193-1>.
- Loss, A. et al. Recuperação do carbono orgânico total e das frações húmicas da matéria orgânica em diferentes usos do solo. *Scientia forestalis*, v. 48, n. 126, 2020.
- Luizão, F. J. 2007. Ciclos de Nutrientes na Amazônia: Respostas às mudanças ambientais e climáticas. *Cienc. Cult.* vol.59 no.3 São Paulo July/Sept.
- Maia, S.M.F.; Xavier, F.A.S.; Senna, O.T.; Mendonca, E.S. & Araujo, J.A. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. *Agrofor. Syst.*, 71:127-138, 2007. 10.1007/s10457-007-9063-8.
- Marfo, T., Datta, R., Pathan, S., Vranová, V., 2019. Ecotone Dynamics and Stability from Soil Scientific Point of View. *Diversity* 11 (4), 53. <https://doi.org/10.3390/d11040053>.
- Marschner, P.; K, E.; M, B. Soil microbial community structure, function, and metabolic diversity in monospecific and mixed stands of European beech and Norway spruce.

Forest Ecology and Management, v. 259, n. 11, p. 2274–2282, 2011. 10.1007/s11104-011-1072-8

- Matoso, S. C. G.; Silva, A. N.; Pereira, E. C. F.; Colleta, Q. P.; Maia, E. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. *Acta Amazônica*, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000200008>.
- Matsunaga, W. K; Rodrigues, H. J. B; Rodrigues, P. Atributos Microbiológicos de Solo, relacionados às Atividades da Microfauna em Solo na Floresta Amazônica. *Anuá. Inst. Geo. –UFRJ*, v. 41, n. 3 p. 630-638, 2018. http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_630_638.
- Mendes, I.C.; H, M.; R, F.B.; F, M.F.; Chaer, G.M.; Mercante, F.M.; Zilli, J.E. Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade? Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. 31 p.
- Mercante, F. M.; Silva, R. F.; Francelino, C. S. F.; Cavalheiro, J. C. T.; Otsubo, A. A. Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 34, n. 4, p. 479-485, 2008. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i4.5301>
- Namitha, V. V.; Raj, S. K.; Prathapan, K. Carbon sequestration potential in coconut based cropping system: A review. *Agricultural reviews*, n. Of, 2022.
- Neumann-Cosel, L.; Zimmermann, B.; Hall, J.S.; Breugel, M. Van; Elsenbeer, H. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures – A case study from Panama. *Forest Ecology and Management*, v.261, p.1625-1633, 2011. 10.1016/j.foreco.2010.07.023
- Oliveira, D. M. S.; Schellekens, J.; Cerri, C. E. P. Molecular characterization of soil organic matter from native vegetation-pasture-sugarcane transitions in Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 548-549, p. 450-462, 2016.
- Oliveira, E. L. De. Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no estado do Paraná. Londrina-PR: Instituto Agrônomo do Paraná, 2013.
- Reatto, A.; Correia, J.R.; Spera, S.T. Solos do Bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: Sano, S.M.; Almeida, S.P. (Ed.). *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998. p.47.
- Reis Júnior, FB e Mendes, LC (2007) - Biomassa microbiana do solo. Embrapa Cerrado, Planaltina. 40 p.
- Rovira P, Jorba M, Romanyà. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils. *Biology and Fertility of Soils*. 2010.
- Santos, A.; Nascimento, F. Transformações ocorridas ao longo da evolução da atividade agrícola: algumas considerações. Centro Científico Conhecer - ENCICLOPÉDIA BIOSFERA. Centro Científico Conhecer - ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, v. 5, n. 8, 2009.
- Sarr, P. S. et al. Phylogeny and nitrogen fixation potential of *Bradyrhizobium* species isolated

from the legume cover crop *Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth. in Eastern Cameroon. *Soil science and plant nutrition*, v. 62, n. 1, p. 13–19, 2016.

- SILVA, Carlos Alberto et al. *Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Tradução.* Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 788: il. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1153147/entendendo-a-materia-organica-do-solo-em-ambientes-tropical-e-subtropical>. Acesso em: 30 out. 2024.
- Silva, E.E.; Azevedo, P.H.S.; De-Polli, H. *Determinação de Respiração Basal (RBS) e Quociente Metabólico do solo (qCO₂); Comunidade Técnico 99—EMBRAPA Agrobiol: Seropédica, Brazil, 2007*
- Sobral, L. F. *Nutrição e adubação.* In: FONTES, H. R.; RIBEIRO, F. E.; FERNANDES, M. F. *Coco produção: aspectos técnicos.* Aracaju: Embrapa, 2003. p. 44-52.
- Sorensen, P. O., Templer, P. H., & Finzi, A. C. (2016). Contrasting effects of winter snowpack and soil frost on growing season microbial biomass and enzyme activity in two mixed-hardwood forests. *Biogeochemistry*, 128(1/2), 141–154. <https://www.jstor.org/stable/48720500>
- Sousa, M. A. De; Reis, I. M. S.; Almada, A. P. De; Rossi, C. Q.; Pereira, M. G.; Pinto, L. A. R. Da S.; Silva, C. F. Da; Santos, O. A. Q. dos. Chemical attributes and fractions of organic matter in anthropic soils in the Eastern Amazon. *Brazilian Journal of Development, [S. l.]*, v. 6, n. 5, p. 29623–29643, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-424. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/10397>. Acesso em: 20 oct. 2023.
- Souza G. P. D, Figueiredo C. C. D, Sousa D. M. G. D. Soil organic matter as affected by management systems, phosphate fertilization, and cover crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira.* 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900067>
- Souza, E.; Carneiro, M. A.; Paulino, H.; Silva, C.; Buzetti, S. Alterações nas frações do carbono em um neossolo quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso do solo. *Acta Scientiarum-agronomy*, v.28,2006. DOI:10.4025/actasciagron.v28i3.938.
- Srinivasa, R. D. V. et al. Response of high yielding coconut variety and hybrids to fertilization under rainfed and irrigated conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Netherlands, v. 62, p. 131-138, 2002. 10.1023/A:1015503807730
- Subramanian, P. *et al.* (2024). *Coco (Cocos nucifera L.)*. Em: Thomas, GV, Krishnakumar, V. (eds) *Gestão da saúde do solo para culturas de plantação.* Springer, Cingapura. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0092-9_2
- Tiecher, T.; et al. Crop Response to Gypsum Application to Subtropical Soils Under No-Till in Brazil: a Systematic Review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20170025>
- Walia M. K, Dick W. A (2023) Gypsum and carbon amendments influence carbon fractions in two soils in Ohio, USA. *PLoS ONE* 18(4): e0283722. <https://doi.org/10.1371/journal>

pone.0283722

- Weil, R. R. et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, v. 18, n. 1, p. 3–17, 2003.
- Zhao, Y.G., Wang, S.J., Liu, J., Zhuo, Y.Q., Li, Y., Zhang, W.C., 2021. Fertility and biochemical activity in sodic soils 17 years after reclamation with flue gas desulfurization gypsum. *J. Integr. Agric.* 20, 3312–3322. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63446-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63446-3).