

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA BACHARELADO

GILVANIA SOUSA PEREIRA

**OTIMIZAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E MELHORIA DA
PRODUTIVIDADE COM BIOMASSA DE LEGUMINOSAS E CÁTIONS
POLIVALENTES: UMA ABORDAGEM PARA AGROSSISTEMAS SUSTENTÁVEIS**

SÃO LUÍS – MA

2024

GILVANIA SOUSA PEREIRA

**OTIMIZAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E MELHORIA DA
PRODUTIVIDADE COM BIOMASSA DE LEGUMINOSAS E CÁTIONS
POLIVALENTES: UMA ABORDAGEM PARA AGROSSISTEMAS SUSTENTÁVEIS**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia
Bacharelado do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Estadual do Maranhão, como
requisito para obtenção do título de Engenheira
Agrônoma.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Kátia Pereira Coelho

Coorientador: M.s Edaciano Leandro Lösch

Documento assinado digitalmente
 GILVANIA SOUSA PEREIRA
Data: 30/07/2024 18:30:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gilvania Sousa Pereira - Discente

Documento assinado digitalmente
 KATIA PEREIRA COELHO
Data: 21/08/2024 08:15:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Kátia Pereira Coelho - Orientadora

SÃO LUÍS – MA

2024

Pereira, Gilvania Sousa

Otimização de atributos físicos do solo e melhoria da produtividade com biomassa de leguminosas e cátions polivalentes: uma abordagem para agrossistemas sustentáveis. / Gilvania Sousa Pereira. – São Luis, MA, 2024.

39 f

Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual do Maranhão, 2024.

Orientador: Profa. Dra. Kátia Pereira Coelho

1.Física do solo. 2.Silício. 3.Cálcio. 4.Plantio direto. I.Título.

CDU: 631.43

GILVANIA SOUSA PEREIRA

**OTIMIZAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E MELHORIA DA
PRODUTIVIDADE COM BIOMASSA DE LEGUMINOSAS E CÁTIONS
POLIVALENTES: UMA ABORDAGEM PARA AGROSSISTEMAS SUSTENTÁVEIS**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia
Bacharelado do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Estadual do Maranhão, como
requisito para obtenção do título de Engenheira
Agrônoma.

Aprovada em: 06/08/2024

BANCA ENXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

EDACIANO LEANDRO LOSCH

Data: 15/08/2024 14:46:11-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M.s Edaciano Leandro Lösch – Coorientador
Universidade Estadual do Maranhão



Documento assinado digitalmente

ALANA DAS CHAGAS FERREIRA AGUIAR

Data: 15/08/2024 12:14:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr^a. Alana das Chagas Ferreira Aguiar
Universidade Federal do Maranhão



Documento assinado digitalmente

ANA MARIA SILVA DE ARAÚJO

Data: 15/08/2024 16:11:16-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr^a. Ana Maria Silva de Araújo
Universidade Estadual do Maranhão

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos pais, Gilvan Viegas e Evila Sousa,
que oferecem amor verdadeiro e incondicional em
todos os dias de minha vida. Agradeço pela educação
que me proporcionaram e pelo apoio constante em
cada passo da minha jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por Sua infinita misericórdia e amor, que foram a força essencial para todas as minhas conquistas até aqui. Sua presença e orientação me deram a coragem necessária para superar os desafios e alcançar meus objetivos, mesmo quando parecia impossível. Sou imensamente grata por Sua ajuda e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus amados pais, Evila e Gilvan, por acreditarem tanto em mim e por sempre me apoiarem com amor e paciência. Suas palavras de encorajamento e seu apoio incondicional foram fundamentais em cada etapa da minha vida. Sou profundamente grata por tudo o que fizeram e continuam a fazer por mim.

Aos meus avós, Leonor e Jorge, por todo o amor e carinho. E em especial à vovó Edna, que sempre me incentivou a buscar, através dos estudos, a realização dos meus sonhos. Sua sabedoria e apoio são para mim fonte de inspiração e motivação.

Aos meus queridos irmãos, Edilene, Vanilma e Alisson, agradeço profundamente por todo o carinho, apoio e momentos de descontração que compartilhamos. Vocês foram uma fonte constante de força e alegria ao longo dessa caminhada. A presença de vocês em minha vida tornou cada desafio mais leve e cada conquista mais significativa.

À minha tia Ediane, que esteve ao meu lado em todos os momentos, obrigada por seu apoio e por sempre acreditar em mim. Sua presença e incentivo foram fundamentais em minha trajetória, e sou imensamente grata por tudo o que fez para me ajudar a alcançar meus objetivos.

Ao meu tio Elves, sou grata por sua presença e compreensão em todos os momentos, por estar ao meu lado e oferecer apoio sempre que precisei.

Às minhas queridas amigas e colegas de turma, Karina Pimentel, Luciana Silva e Renata Gomes, pela amizade sincera, pelo incentivo constante e pela ajuda nos trabalhos de campo e laboratório. Sou grata por todos os momentos compartilhados juntas. Vocês tornaram esses anos de graduação muito mais leves e especiais.

À minha amiga Abgail, agradeço pelos longos anos de amizade e por me ouvir nos momentos que mais precisei. Obrigada por ter me acompanhado por todo esse processo e pela sua dedicação e disponibilidade. Sua ajuda e apoio foram para mim de valor inestimável!

Ao meu namorado, Elenilson, quero expressar minha profunda gratidão por estar ao meu lado em todos os momentos. Suas palavras de encorajamento, seu apoio e sua presença em minha vida são essenciais. Obrigada por acreditar em mim e por todo o incentivo. Seu amor e cuidado me inspiram e me fazem querer ser melhor.

Ao querido professor Emanuel (in memoriam), sou profundamente grata pelas orientações que enriqueceram meu pensamento e me incentivaram a ser mais firme e focada na busca dos meus objetivos. Sua sabedoria e orientação tiveram um impacto significativo em minha jornada, e seu legado continuará a me inspirar.

À minha orientadora, Prof. Kátia, e ao meu co-orientador, Edaciano, meu sincero agradecimento pela orientação, paciência e disponibilidade em me guiar ao longo deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para realização deste projeto, sou imensamente grata por todo o apoio que recebi de ambos.

E, por fim, sou grata a mim mesma por não desistir e, mesmo nos momentos em que parecia impossível, manter a convicção de que, de alguma forma, meu esforço valeria a pena. Reconheço e valorizo minha determinação e persistência ao longo de toda minha trajetória.

EPÍGRAFE

*“Eu sei que estaria mais seguro se não colocasse
minha alma em tudo, mas essa é a forma mais
sincera de viver.”*

(Diego Vinicius)

RESUMO

Nos trópicos úmidos a degradação da terra resulta da rápida decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), combinada a solos altamente intemperizados e alta pluviosidade. Este estudo avaliou os impactos da deposição de biomassa de leguminosas, com e sem aplicação de Cálcio, Silício e ureia, sobre os indicadores físicos de qualidade do solo e produtividade do milho. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso (DBC) com 8 tratamentos e 4 repetições, com os seguintes tratamentos: Ureia (U); Leguminosas (L); Leguminosas + Ureia (L+U); Cálcio + Leguminosas (Ca+L); Silício + Leguminosas (Si+L); Cálcio + Leguminosas + Ureia (Ca+L+U); Silício + Leguminosas + Ureia (Si+L+U); Cálcio + Silício + Leguminosas + Ureia (Ca+Si+L+U). Foram avaliadas a densidade, porosidade, resistência do solo à penetração e produtividade do milho. Os resultados destacaram que a combinação de cátions polivalentes com biomassa de leguminosas aumentou significativamente a macroporosidade do solo, superando o valor crítico de 10%. Os tratamentos com silício reduziram a resistência à penetração na camada de 0-20 cm. A produtividade do milho foi maior nos tratamentos combinados, especialmente com Ca+Si+L+U, evidenciando a importância dos cátions polivalentes na melhoria da estrutura do solo e no aumento da produção agrícola. Nossos resultados sugerem que a combinação desses cátions polivalentes com leguminosas de alta qualidade podem melhorar a qualidade física do solo e aumentar a produtividade das plantas, especialmente em regiões tropicais úmidas.

Palavras-chave: Física do solo; Silício; Cálcio; Plantio direto.

ABSTRACT

In the humid tropics, land degradation results from the rapid decomposition of soil organic matter (SOM), combined with highly weathered soils and high rainfall. This study evaluated the impacts of legume biomass deposition, with and without application of calcium, silicon and urea, on physical indicators of soil quality and maize productivity. The experimental design adopted was randomized blocks (DBC) with 8 treatments and 4 replications, with the following treatments: Urea (U); Legumes (L); Legumes + Urea (L+U); Calcium + Legumes (Ca+L); Silicon + Legumes (Si+L); Calcium + Legumes + Urea (Ca+L+U); Silicon + Legumes + Urea (Si+L+U); Calcium + Silicon + Legumes + Urea (Ca+Si+L+U). The density, porosity, soil resistance to penetration and maize productivity were evaluated. The results highlighted that the combination of polyvalent cations with legume biomass significantly increased soil macroporosity, exceeding the critical value of 10%. Silicon treatments reduced penetration resistance in the 0-20 cm layer. Corn productivity was higher in combined treatments, especially with Ca+Si+L+U, highlighting the importance of polyvalent cations in improving soil structure and increasing agricultural production. Our results suggest that combining these polyvalent cations with high-quality legumes can improve soil physical quality and increase plant productivity, especially in humid tropical regions.

Keywords: Soil physics; Silicon; Calcium; No-till.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Croqui da área experimental.....	24
Figura 2 - Resistência do solo à penetração na profundidade de 0-40 cm	28
Figura 3 - Produtividade média (kg ha^{-1}) de milho (<i>Zea Mays</i>) em solo submetido a aplicação de biomassa, cátions e ureia.	29
Figura 4 - Correlação de Pearson entre as propriedades físicas do solo e a produtividade do milho.....	30
Figura 5 - Análise dos componentes principais das propriedades físicas do solo e produtividade do milho.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores de densidade (Ds), maroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (Pt) do solo na camada de 0 -20 cm submetido a aplicação de biomassa, cátions e ureia.	27
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1 INDICADORES FÍSICOS DA QUALIDADE DO SOLO.....	17
3.1.1 Densidade.....	17
3.1.2 Porosidade do solo	18
3.1.3 Resistência do solo à penetração.....	19
3.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO	19
3.3 USO DE LEGUMINOSAS COMO FONTE DE BIOMASSA	20
3.4 PAPEL DO CÁLCIO E SILÍCIO NA ESTRUTURA FÍSICA DO SOLO	21
4 METODOLOGIA	23
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA: LOCALIZAÇÃO, SOLO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ..	23
4.2 HISTÓRICO DA ÁREA.....	23
4.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	23
4.4 ANÁLISE FÍSICA DO SOLO.....	24
4.5 PRODUTIVIDADE	25
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	25
5 RESULTADOS.....	26
6 DISCUSSÃO.....	32
7 CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Nos trópicos úmidos, a degradação do solo ocorre quando o manejo do agrossistema falha em compensar os processos naturais que aceleram a decomposição da matéria orgânica e reduzem a quantidade de cátions básicos, devido à alta taxa de lixiviação (Moura, 2020). Esta dificuldade resulta da combinação de solos altamente intemperizados, com baixa capacidade de retenção de cátions, e um índice pluviométrico elevado, frequentemente excedendo 2.000 mm anuais (Nunes *et al.*, 2024). Além disso, muitos desses solos possuem baixa resiliência à degradação física, devido ao reduzido conteúdo de elementos agregadores, como carbono, cálcio e ferro (Moura *et al.*, 2018). Como consequência, o desafio de evitar a degradação do solo torna-se uma tarefa complexa, o que exige mudanças profundas no manejo para garantir a sustentabilidade dos agrossistemas (Signor *et al.*, 2018).

Nos solos coesos desta região, a camada superficial contém apenas teores moderados de carbono orgânico, que, embora favoráveis ao crescimento radicular, não são suficientes para sustentar o desenvolvimento das culturas (Giarola *et al.*, 2011). Adicionalmente, parte desses solos apresenta alta resistência à penetração, o que reduz o comprimento e a espessura das raízes, resultando em menor produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos (Senna, 2020).

Nesse contexto, é essencial adotar estratégias que melhorem a qualidade física do solo para garantir uma agricultura sustentável e produtiva. Uma abordagem eficaz deve incluir o estímulo ao crescimento radicular e a melhoria das propriedades físicas (Quesada *et al.*, 2020). Criar uma estrutura de solo que permita o desenvolvimento das raízes, tanto lateralmente quanto em profundidade, é fundamental para alcançar alta eficiência na absorção de nutrientes.

Diante disso, do ponto de vista da importância para a agricultura, o conteúdo de matéria orgânica é um indicador-chave, pois afeta as três dimensões da qualidade dos solos, e a dimensão física é essencial para o manejo sustentável dos solos tropicais. Na ausência de outros agregadores, como óxidos de ferro ou alumínio, a matéria orgânica é a maior responsável em manter condições físicas que favoreçam o crescimento das raízes (Maltas *et al.*, 2018). Em solos propensos à coesão, o aumento da matéria orgânica do solo (MOS) melhora a estabilidade dos agregados e reduz a resistência à penetração. Assim, com a maior agregação promovida pela MOS, o volume total de poros aumenta, facilitando o crescimento das raízes e melhorando a absorção de água e nutrientes (Jimenez *et al.*, 2017).

No entanto, nas condições do trópico úmido, o acúmulo de matéria orgânica se dá por meio da estabilização da necromassa microbiana, mais do que pela recalcitrância do substrato

adicionado (Cotrufo e Lavellee, 2022). Isto ressalta a importância dos estabilizadores da matéria orgânica nos processos de decomposição/estabilização.

Dessa forma, um dos mecanismos que pode favorecer a estabilização da matéria orgânica do solo envolve as interações entre os compostos resultantes da decomposição da biomassa e as superfícies minerais de cátions polivalentes, como cálcio, magnésio, ferro e silício (Cotrufo e Lavellee, 2022). Esses cátions participam dos processos de troca iônica no solo, o que influencia tanto a disponibilidade de nutrientes para as plantas quanto a capacidade do solo em retê-los (Solly et al., 2020).

Nesse sentido, o uso de biomassa de leguminosas e cátions polivalentes emerge como uma alternativa promissora para a recuperação e melhoria das condições físicas dos solos do trópico úmido. As leguminosas contribuem para o aumento do teor de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, para a melhoria da sua fertilidade (Senna *et al.*, (2020). Enquanto os cátions polivalentes interagem com os grupos funcionais da matéria orgânica, formando pontes de cátions que ajudam a estabilizá-la (Moore e Turunen, 2004). No entanto, ainda são necessários mais estudos que investiguem a combinação desses elementos e seus efeitos específicos sobre os atributos físicos do solo.

Diante do exposto, hipotetizamos que a combinação de biomassa de leguminosas e cátions polivalentes promovem melhorias na porosidade, densidade e resistência à penetração do solo. Espera-se também que essa intervenção aumente a produtividade das culturas em solos coesos das áreas periféricas da Amazônia maranhense. Portanto, o presente estudo avaliou os impactos da deposição de biomassa proveniente de leguminosas, com e sem a aplicação de Ca, Si e ureia, sobre os indicadores físicos de qualidade do solo e na produtividade de milho.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os impactos do uso de biomassa de leguminosas e da aplicação dos cátions polivalentes cálcio e silício sobre as propriedades físicas de um solo de baixa fertilidade natural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o efeito da combinação de biomassa de leguminosas e cátions polivalentes sobre a resistência à penetração do solo;
- Avaliar os efeitos do uso combinado de biomassa de leguminosas e dois cátions polivalentes sobre a densidade do solo;
- Estimar o impacto do uso combinado de biomassa de leguminosas e dos cátions cálcio e silício sobre a porosidade do solo;
- Avaliar o rendimento do milho em função das mudanças nos atributos físicos do solo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 INDICADORES FÍSICOS DA QUALIDADE DO SOLO

A manutenção da qualidade física do solo é necessária para o crescimento das plantas e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Um solo com qualidade física afetada pode ser caracterizado por baixa infiltração de água, escoamento superficial do solo, má aeração, coesão e baixa capacidade de enraizamento (Reichert *et al.*, 2008). Dessa forma, conhecer os valores críticos dos indicadores físicos pode contribuir para a escolha dos sistemas de manejo, o que aumenta a qualidade do solo, o rendimento e o crescimento das culturas (Sena, 2015), uma vez que esses indicadores variam conforme o tipo de solo e o sistema de manejo adotado (Lal, 2000).

Do ponto de vista agrícola, os principais indicadores físicos utilizados para avaliar a qualidade do solo incluem a textura, a estrutura, a densidade, a macroporosidade, microporosidade, a porosidade total e a resistência à penetração. Esses indicadores são importantes não apenas por estabelecerem relações com os processos hidrológicos, mas também por desempenharem funções importantes no suprimento e armazenamento de água, nutrientes e oxigênio no solo (Silva *et al.*, 2020).

Entre esses indicadores, a porosidade e a densidade do solo têm sido os mais utilizados como indicadores da qualidade do solo, por serem propriedades dinâmicas, suscetíveis ao uso e de fácil determinação, e estão relacionadas à compactação e à restrição relativa ao crescimento radicular. Um aspecto comum entre os indicadores é que eles expressam direta ou indiretamente o volume ou a função do espaço poroso no solo. Portanto, identificar o volume ótimo de poros e sua função no solo pode melhorar a compreensão sobre a qualidade física, o impacto ambiental dos sistemas de manejo, a produtividade das culturas e a dinâmica de água e solutos no perfil do solo (Reynolds *et al.*, 2008).

3.1.1 Densidade

A densidade do solo (D_s) é um atributo que pode ser usado como parâmetro de qualidade física para determinar os poros médios e descrever a compactação do solo, sendo definida pela relação entre a massa de uma amostra de solo seco e seu volume. Esta é uma propriedade-chave em Ciência do Solo, considerada indicadora da qualidade estrutural do solo (Lima *et al.*, 2006; Ferreira, 2010) por influenciar várias outras propriedades, como infiltração e retenção de água, e processos importantes como o crescimento radicular (Grossman; Reinsch, 2002; Stolf *et al.*, 2011).

A densidade do solo deve permanecer no intervalo entre 1,1 e 1,6 Mg m⁻³ em solos minerais, e pode assumir valores superiores a 1,6 Mg m⁻³ em solos de textura arenosa (Kiehl, 1979). Valores mais altos de densidade indicam maior compactação, o que pode aumentar o escoamento superficial, já que a compactação do solo aumenta a densidade e reduz a porosidade (Keller *et al.*, 2010). O aumento da densidade, devido à aplicação de força externa, é caracterizado pela diminuição dos espaços porosos, o que dificulta a penetração de raízes no solo e, portanto, é um indicador sensível às variações de manejo empregado (Mota *et al.*, 2013).

Diversos fatores podem modificar a densidade do solo, incluindo a cobertura vegetal, a presença de resíduos na superfície do solo e a quantidade de matéria orgânica. Estes elementos ajudam na qualidade física do solo, especialmente diante das intempéries externas (Ferreira, 2016). O aumento da matéria orgânica do solo (MOS) diminui a densidade do solo devido a um efeito de diluição causado pela mistura da biomassa mais leve com a fração mineral mais densa do solo (Malta *et al.*, 2018).

Em solos arenosos como os do Maranhão, o número relativo de pequenos poros é aumentado pela MOS, como resultado da menor densidade do solo (Robin *et al.*, 2018). Após a adição de matéria orgânica, a área superficial específica das partículas aumenta, o que resulta em maior capacidade de retenção de água em tensões mais altas (Khdaier *et al.*, 2019). Assim, para um crescimento e funcionamento eficaz das raízes das culturas, é necessário que o solo possua uma aeração adequada e capacidade de retenção de água, além de apresentar baixa densidade ou resistência (Reynolds *et al.*, 2007).

3.1.2 Porosidade do solo

A porosidade total (PT) do solo é a relação entre o volume dos poros e o volume do solo. Na prática, é calculada a partir da densidade aparente assumindo uma densidade de partículas do solo de 2,65 gcm⁻³. Geralmente, solos com maior porosidade apresentam maior capacidade de armazenar líquidos, solutos, gases e calor (Dexter *et al.*, 2008).

O conhecimento da PT é importante para se entender o movimento e a retenção de água, ar e solutos no solo, entre outros aspectos. Em solos arenosos prevalece macroporos, enquanto em solos argilosos a tendência é predominar microporos (De Almeida *et al.*, 2017). De acordo com Reichardt e Timm (2012) poros superiores a 100 µm de diâmetro constituem os macroporos e são responsáveis pelo livre movimento da água e aeração do solo, enquanto os poros de diâmetro inferior compreendem a microporosidade do solo e possuem a capacidade de retenção da água, auxiliando no armazenamento de água no solo.

3.1.3 Resistência do solo à penetração

A resistência à penetração (RP) é um parâmetro utilizado para compreender o impacto do solo no crescimento e desenvolvimento das plantas, especialmente no que diz respeito à eficiência do sistema radicular. Este fenômeno é resultado da interação complexa entre diversos fatores, incluindo umidade do solo, densidade e compactação. A correlação positiva e exponencial entre a RP e a umidade do solo tem sido bem estabelecida na literatura (Hakansson; Lipiec, 2000).

Quando há um aumento da resistência à penetração, o que pode causar efeitos prejudiciais ao sistema radicular das culturas, há modificações morfológicas e fisiológicas específicas em cada espécie ou cultivar. Além disso, é importante salientar que a RP está intimamente ligada à compactação do solo, o que pode explicar as dificuldades enfrentadas no desenvolvimento das plantas (Silva *et al.*, 2020).

Por meio da avaliação da RP é possível identificar camadas compactadas e variações nas propriedades físicas ao longo dos diferentes horizontes do solo, o que contribui para a compreensão da vulnerabilidade do solo a processos erosivos (Reichert *et al.*, 2010). Em condições de menor umidade, observa-se um aumento na coesão e resistência do solo à penetração, o que pode resultar em um aumento na força necessária para o crescimento radicular (Hamza; Anderson, 2005). Nesse sentido, parâmetros como densidade e conteúdo de água do solo são muito importantes na quantificação da RP, com a densidade apresentando uma relação direta com a resistência (Borges *et al.*, 1988). Valores iguais ou superiores a 2,0 MPa de resistência à penetração do solo têm sido associados a condições impeditivas para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (Silva, Tormena e Imhoff, 2002).

3.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

O termo "compactação do solo" se refere ao processo no qual há uma redução no volume de solos não saturados, devido à aplicação de uma pressão externa. Esse fenômeno pode ser desencadeado por diversos fatores (Torres *et al.*, 2013).

A compactação do solo, causada principalmente por processos naturais e pelo uso de maquinaria pesada no preparo do solo, refere-se ao arranjo da matriz do solo resultante das forças aplicadas. Este processo reduz o volume dos poros e aumenta a densidade do solo, o que gera uma diminuição da porosidade total e da macroporosidade (Girardello *et al.*, 2014).

O processo de compactação do solo é causado por dois grupos principais de fatores: (i) fatores externos, que incluem o tipo, intensidade e frequência do pastejo; e (ii) fatores internos,

que envolvem o histórico de tensão, umidade, textura, estrutura, densidade inicial do solo e teor de carbono (Gurgel, 2019). Como resultado, o solo compactado apresenta maior resistência à penetração, um atributo que depende não só da densidade, mas também do conteúdo de água armazenado no solo (Oliveira Filho *et al.*, 2015). A resistência à penetração é um dos atributos físicos mais indicados na avaliação da compactação do solo, pois apresenta relações estreitas com o desenvolvimento das plantas, especialmente quando associado à densidade do solo (Montanari *et al.*, 2010; Freddi *et al.*, 2006).

A compactação do solo pode resultar em menor produtividade final das culturas, devido à menor absorção de água e nutrientes pelo sistema radicular. Em solos compactados, as raízes das plantas não conseguem utilizar adequadamente os nutrientes disponíveis, pois o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado (Torres *et al.*, 2013). O manejo do sistema é crucial para evitar ou promover tal processo, visto que as modificações estruturais causadas no solo pelos diferentes sistemas de manejo podem resultar em maior ou menor grau de compactação. Além disso, solos compactados podem contribuir para o aquecimento global, por aumentarem a emissão de Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4) e Óxido nitroso (N_2O) do solo. Isso ocorre pelo aumento da densidade, redução do tamanho de poros, alto teor de água do solo e redução da aeração, que favorecem o aumento da anaerobiose (Gurgel, 2019).

3.3 USO DE LEGUMINOSAS COMO FONTE DE BIOMASSA

É amplamente aceito entre os pesquisadores que a aplicação de resíduos vegetais como cobertura tem um impacto positivo no manejo sustentável do solo (Wang *et al.*, 2021; Senna *et al.*, 2020; Moura *et al.*, 2020). Esse benefício decorre das diversas vantagens associadas à cobertura morta, particularmente em climas tropicais, onde ela ajuda a diminuir a temperatura do solo e a perda de umidade (Awe *et al.*, 2015), mantém o equilíbrio do carbono orgânico no solo e promove a reciclagem de nutrientes minerais (Wang *et al.*, 2021). Além disso, a cobertura com resíduos vegetais também melhora a estabilidade dos agregados e a estrutura do solo (Luna *et al.*, 2016), reduz a resistência do solo à penetração (Senna *et al.*, 2020) e aumenta a absorção de água e nutrientes (Moura *et al.*, 2020).

A utilização de leguminosas desempenha um papel mais relevante em comparação com outras espécies, pois elas proporcionam uma maior quantidade de massa vegetal ao solo e formam associações simbióticas com microrganismos fixadores de nitrogênio. Esse mutualismo resulta em um fornecimento maior de nitrogênio para a cultura principal, e gera maior interesse econômico por parte dos agricultores. Assim, essa prática agrícola contribui

para a redução do uso de insumos, como fertilizantes minerais nitrogenados, e pode ser utilizada como uma estratégia para diminuir os custos de produção (Arrobas *et al.*, 2013).

O uso da cobertura com biomassa para as condições tropicais é a prática mais indicada para melhorar o ambiente da zona das raízes, visto que, a aplicação continuada de cobertura aumenta os teores de matéria orgânica derivada da decomposição da biomassa (Moura *et al.*, 2014). Diante disso, a cobertura realizada com biomassa de leguminosas é especialmente recomendada como uma opção para o manejo de solos coesos, pois ajuda a preservar a umidade e atrasa o endurecimento, mesmo sob altas taxas de evaporação (Moura 2018; Kader *et al.*, 2019).

A presença de leguminosas na cobertura do solo pode aumentar a atividade microbiana no solo, promovendo processos biológicos benéficos, como a mineralização de nutrientes e a formação de húmus. Consequentemente, a alta relação carbono/nitrogênio (C/N) das leguminosas em comparação com outras plantas de cobertura pode contribuir para a formação de húmus estável e aprimorar a qualidade do solo a longo prazo. Ademais, a decomposição da biomassa de leguminosas libera gradualmente nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, o que contribui para a fertilidade do solo em longo prazo (Marques *et al.*, 2017).

Sob as condições do trópico úmido, o aumento da matéria orgânica no solo ocorre principalmente por meio da estabilização da necromassa microbiana, em vez da resistência do material orgânico adicionado (Cotrufo e Lavelle, 2022). Por isso, os serviços ecológicos que maximizam a entrada e a estabilização da MOS são essenciais para protegê-la da decomposição total e para manter seus níveis mais adequados à prática da agricultura.

3.4 PAPEL DO CÁLCIO E SILÍCIO NA ESTRUTURA FÍSICA DO SOLO

Embora a aplicação de resíduos de leguminosas na superfície do solo seja recomendada para melhorar a capacidade de enraizamento, seu efeito é limitado em profundidade (Moura *et al.*, 2013). Dessa forma, além do plantio direto na palha de leguminosas, são necessárias outras práticas para ampliar o sistema radicular em profundidade e, consequentemente, aumentar a absorção de nutrientes.

O gesso tem sido recomendado para solos tropicais devido à importância do cálcio para o crescimento radicular das plantas. Estudos indicam que o cálcio e o magnésio podem ser utilizados como "agentes floculantes" para melhorar a estrutura do solo e reduzir a dispersão da argila, ampliando assim a capacidade de penetração das raízes em camadas mais profundas do solo (Anikwe *et al.*, 2016).

Alguns autores ressaltam as interações benéficas entre o cálcio e a matéria orgânica formada a partir do resíduo usado como cobertura morta (Wuddivira e Camps-roach, 2007). Nos últimos anos foi comprovado que as interações entre a MOS e os cátions básicos colaboram na estabilização da MOS e na retenção dos referidos cátions no perfil do solo (Ellerbrock e Gerke, 2018).

Dos mecanismos que podem contribuir para a estabilização da MOS, as interações dos compostos resultantes da decomposição da biomassa com as superfícies minerais de cátions polivalentes (como Ca, Mg, Fe e Si) são consideradas as mais eficazes e viáveis do ponto de vista prático (Von Lützow *et al.*, 2006). Esses cátions polivalentes interagem com grupos funcionais da MOS, formando pontes de cátions, o que conduz a uma relativa estabilização da MOS (Moore e Turunen, 2004). As ligações entre os cátions polivalentes e os grupos funcionais da MOS são amplamente reconhecidas por reduzirem a acessibilidade à atividade microbiana, resultando em uma maior estabilidade da matéria orgânica (Von Lützow *et al.*, 2006).

Dessa forma, a combinação de fontes de cálcio com a biomassa de leguminosas se mostra uma estratégia eficiente para aprimorar o ambiente radicular, por incrementar a quantidade de cálcio e matéria orgânica, ao mesmo tempo em que diminui a resistência do solo (Moura *et al.*, 2018).

Assim também, o silício (Si) tem demonstrado a capacidade de regular a estabilização do carbono orgânico do solo (COS). Os fitólitos, uma forma biogênica de Si, possuem uma estrutura multiporosa com pequenos diâmetros de poros e uma grande área específica, o que facilita a adsorção ou o preenchimento do COS em suas cavidades ou superfícies externas. Isso reduz a exposição do COS a micróbios e enzimas, influenciando o ciclo biogeoquímico do Si e, consequentemente, os comportamentos do ferro (Fe), alumínio (Al) e SOC, componentes essenciais das associações mineral-orgânicas e dos agregados do solo, o que pode afetar a porosidade do solo e a estabilidade dos agregados (Zhaoliang *et al.*, 2018). Além disso, a fertilização com silício pode aumentar o crescimento das plantas sob diversas condições de estresse, tanto abiótico quanto biótico, contribuindo significativamente para um melhor desenvolvimento das plantas e, consequentemente, para a absorção mais eficiente de nutrientes do solo (Zhaoliang *et al.*, 2018).

Portanto, solos enriquecidos com cálcio e silício podem influenciar o acúmulo de matéria orgânica estabilizada, aumenta a capacidade do solo de reter cátions e a capacidade de enraizamento, além de evitar os efeitos adversos da concentração de cátions ácidos na zona radicular (Ramos *et al.*, 2018). Esses processos, em conjunto, podem contribuir para evitar a degradação dos solos em condições tropicais úmidas (Sena *et al.*, 2020).

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA: LOCALIZAÇÃO, SOLO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

O experimento foi conduzido no Campo Experimental da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, São Luís-MA, Brasil (2° 30' 4'' S e 44° 18' 33'' W). O clima da região é do tipo Aw, segundo Koppen, caracterizado por apresentar um clima tropical chuvoso com duas estações bem definidas, uma estação seca e uma estação chuvosa, com uma média de precipitação de 2.100 mm ano⁻¹. Com temperatura mínima de 23°C, a máxima de 37°C e a temperatura média é de aproximadamente 28°C.

O solo da área foi caracterizado como um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico coeso textura franco-arenosa (Embrapa, 2013).

4.2 HISTÓRICO DA ÁREA

Anteriormente a este estudo, a área foi utilizada para avaliar o efeito da biomassa de leguminosas nos atributos do solo e na produtividade de culturas agrícolas. No experimento anterior, algumas parcelas foram exclusivamente dedicadas ao cultivo de leguminosas e foram mantidas dessa forma para o experimento subsequente. A implementação desta experiência anterior ocorreu em 2011. Em 2011, foram aplicados 390 kg ha⁻¹ de Ca e 130 kg ha⁻¹ de Mg, por meio da aplicação de cal superficial (1 t ha⁻¹) e gesso (6 t ha⁻¹). No ano de 2016, 4 t ha⁻¹ de gesso e 1 t ha⁻¹ de cal foram reaplicados, o que corresponde a 390 kg ha⁻¹ de Ca e 130 kg ha⁻¹ de Mg para aplicação de cal, e 680 kg ha⁻¹ de Ca para aplicação de gesso.

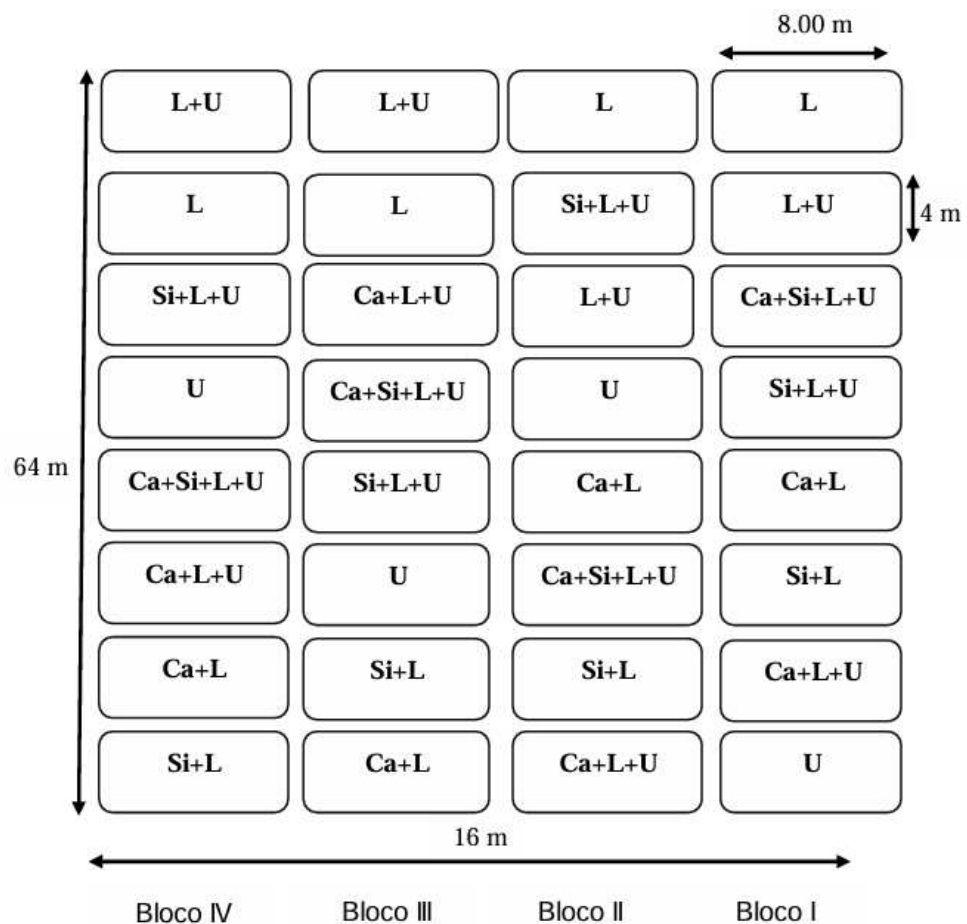
4.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O delineamento experimental foi estabelecido em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições e oito tratamentos: Ureia (U); Leguminosas (L); Leguminosas + Ureia (L+U); Cálcio + Leguminosas (Ca+L); Silício + Leguminosas (Si+L); Cálcio + Leguminosas + Ureia (Ca+L+U); Silício + Leguminosas + Ureia (Si+L+U); Cálcio + Silício + Leguminosas + Ureia (Ca+Si+L+U) (Figura 1). As parcelas mediam 32 m² e área total de 1.024 m².

As leguminosas utilizadas como fonte de biomassa foram *Stylosanthes* var. Campo Grande (*Stylosanthes capita* x *Stylosanthes macrocephala*), gliricídia (*Gliricidia sepium*) e leucena (*Leucaena leucocephala*), que apresentaram relação C/N de 10,6; 13,51 e 11,48, respectivamente. A biomassa de estilóides foi cultivada na área experimental e, leucena e

gliricídia foram coletadas em áreas adjacentes ao experimento. No total foram aplicados 7.700 kg $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de biomassa de leguminosas. Após o corte e aplicação da biomassa, foi plantado milho (*Zea mays L.* - cultivar AG 1051) com espaçamento de 80 cm entre linhas e 20 cm entre plantas. Foram aplicados 83 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 55 kg ha^{-1} de KCl no plantio do milho. O nitrogênio (ureia) foi aplicado nas doses de 110 kg. $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ no plantio e 200 kg. $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ aos trinta e cinquenta dias após o plantio do milho. Em 2022 e 2023 foram aplicados 1 t/ha de cálcio (gesso agrícola) e 1 t/ha de silício (terra de diatomáceas) nas parcelas pré-determinadas.

Figura 1 - Croqui da área experimental



4.4 ANÁLISE FÍSICA DO SOLO

As amostras de solo para análise física foram coletadas em junho de 2023 na camada de 0-20 cm de profundidade. Para tal, realizou-se a abertura de trincheiras para coleta de amostras de solo com anéis volumétricos de bordas biseladas, de aproximadamente 4,88cm de diâmetro e 5,28cm de altura para análise de macroporosidade (MA), microporosidade (MI), porosidade total (PT) e densidade do solo (DS). As amostras foram coletadas em um ponto central da

parcela, na entrelinha da cultura do milho, após a limpeza da superfície do terreno. Foram coletadas três sub amostras por parcela.

Após a coleta das amostras, ainda no campo, retirou-se o excesso de solo dos bordos dos anéis e o bordo inferior do anel foi envolvido com tecido de poliéster e elástico de borracha para evitar perdas de solo. Em laboratório, as amostras foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com altura de água atingindo 3/4 da altura dos anéis. Após 24 h de imersão em água, obteve-se a massa saturada das amostras. Em seguida, por meio da mesa de tensão (Dane e Hopmans, 2002), iniciou-se a drenagem das amostras na tensão de 0,006 MPa, obtendo a massa úmida do solo em equilíbrio nessa tensão, para em seguida serem colocadas para secar a 105° C por 48h em estufa de aeração forçada para obtenção de massa de solo seco.

A densidade do solo foi calculada pelo quociente da massa de solo e o volume do anel volumétrico. Considerando que a tensão de drenagem de 0,006 MPa é suficiente para retirar a água alocada nos macroporos, foi possível determinar o volume de microporos de acordo com os procedimentos descritos em Danielson *et al.* (1986). Com a diferença entre as massas das amostras saturadas com água e secas a 105°C, tendo o volume conhecido das amostras, calculou-se a porosidade total do solo. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo.

Em relação a resistência à penetração (RP), esta foi avaliada nas profundidades de 0 – 40 cm, com o uso de penetrômetro digital (Falker, Porto Alegre, Brasil) com gradações de 1 cm. A tabela de nível crítico de Hazelton e Murphy (2007) foi usada para construir o gráfico de resistência à penetração do solo.

4.5 PRODUTIVIDADE

Para os parâmetros de rendimento e produtividade do milho foram coletadas 10 espigas de milho, área equivalente a 2 m² de cada parcela, os grãos foram secos ao sol e em estufa de secagem para alcançarem umidade de 13%. Foram avaliadas as quantidades de grãos em 1 m de fileira (grãos/metro), massa de 100 grãos (gr) e produtividade total (kg ha⁻¹) (Rizzardi; Witeck; Deggerone, 1994; Balbinot et al., 2005).

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste de homogeneidade e normalidade, seguido do teste de LSD para comparação das médias das variáveis de cada tratamento ao nível de significância de 5%. Adotou-se a correlação linear de

Pearson e análise de componentes principais (ACP). Foram utilizados os pacotes exp.DES.pt, GGally, ggplot2 e factoextra no software R versão 4.1.3 (2021).

5 RESULTADOS

Os resultados indicaram que não houve diferença estatisticamente significativa nas variáveis densidade do solo ($p=0,42$) e porosidade total ($p=0,52$) entre os diferentes tratamentos (Tabela 1), indicando que a adição de biomassa de leguminosas com cátions polivalentes não influenciou de maneira distinta essas propriedades do solo. A densidade aparente variou entre $1,49 \text{ g/cm}^3$ (Ca + Si + L + U) e $1,58 \text{ g/cm}^3$ (L + U).

Em relação a macroporosidade, no tratamento Si+L foi mais alta (14,74%), significativamente maior ($p=0,001$) quando comparado aos tratamentos L e L+U. A macroporosidade em Si+L foi 56,45% e 62,52% superior aos tratamentos L (9,42%) e L+U (9,07%), respectivamente. Os tratamentos com cátions (Si+L, Ca+L+U, Si+L+U, Ca+Si+L+U) apresentaram, em média, uma macroporosidade 31,26% maior em comparação aos tratamentos que não receberam cátions.

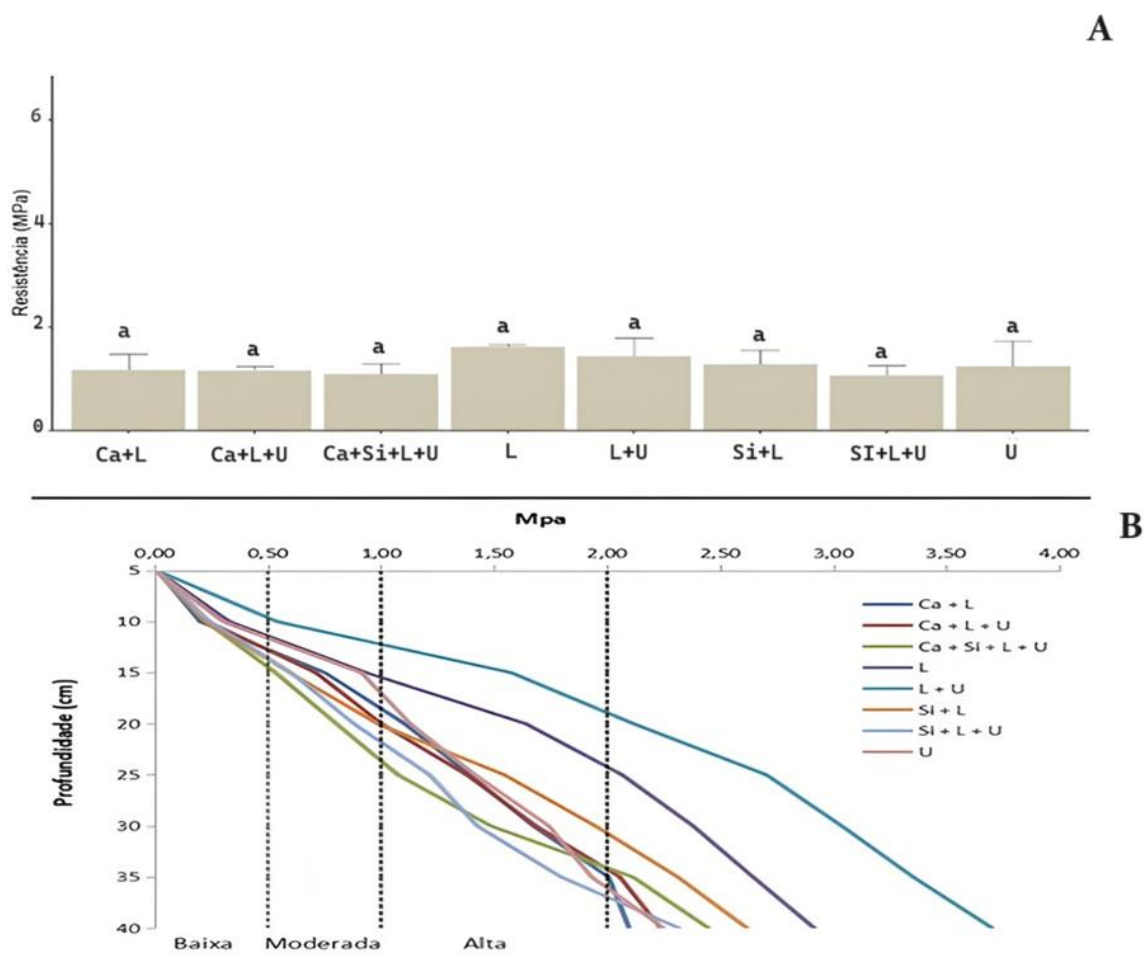
Para a microporosidade, o tratamento L foi significativamente maior ($p=0,04$) em relação aos demais tratamentos, exceto para o Ca+L e L+U. Já no tratamento (U) houve a redução de 12,28% na microporosidade em relação ao tratamento L (31,51%).

Tabela 1- Valores de densidade (Ds), maroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT) do solo na camada de 0 -20 cm submetido a aplicação de biomassa, cátions e ureia.

Tratamento	Ds	Macro	Micro	PT
	g/cm ³	————— % —————		
U	1,56 a	11,44 bc	27,64 bc	39,08 a
L	1,52 a	9,42 c	31,51 a	40,93 a
L+U	1,58 a	9,08 c	29,61 ab	38,68 a
Si+L	1,55 a	14,74 a	26,70 c	41,44 a
Ca+L	1,53 a	11,42 bc	28,94 abc	40,36 a
Ca+L+U	1,57 a	11,24 bc	28,40 bc	39,64 a
Si+L+U	1,54 a	12,70 ab	27,95 bc	40,65 a
Ca+Si+L+U	1,50 a	13,74 ab	27,19 bc	40,68 a

Legenda: Tratamentos: U (ureia); L (leguminosas); L + U (leguminosas + ureia); Ca + L (cálcio + leguminosas); Si + L (silício + leguminosas); Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); Si + L + U (silício + leguminosas + ureia); Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). * Diferentes letras indicam diferença entre os tratamentos com base no teste LSD ($p < 0,05$). CV Densidade CV= 3,52%; Macroporosidade CV= 14,54%; Microporosidade CV= 6,82%; Porosidade total CV=5,01%.

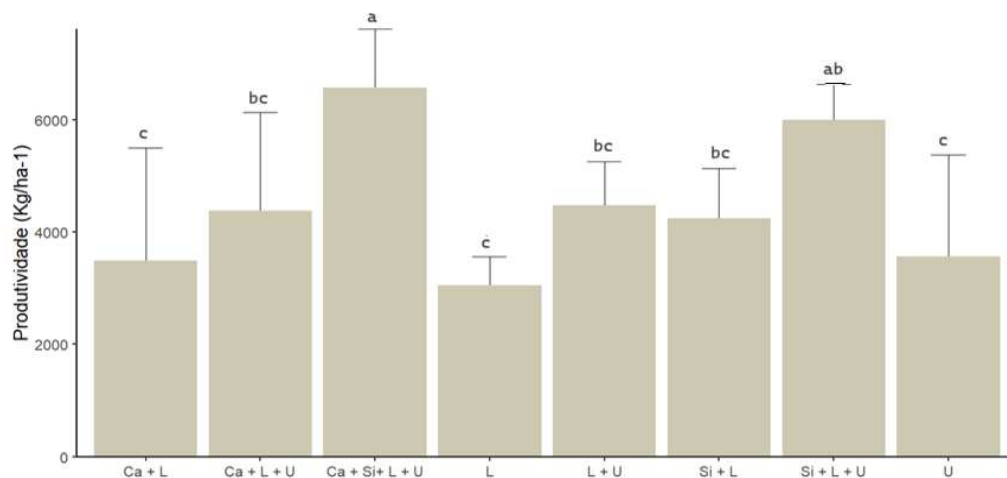
Embora a RP não ter apresentado diferenças entre os tratamentos (Figura 2a), observa-se que na camada de 0-20 cm, os tratamentos Ca+Si+L+U, Si+L+U, Ca+L+U e Si+L mantiveram os valores de resistência à penetração dentro da faixa moderada, com RP entre 0,50 e 1,00 MPa (Figura 2b). Por outro lado, os tratamentos L+U e L ultrapassaram 1 MPa nas profundidades de aproximadamente 18 cm e 23 cm, respectivamente. Enquanto em profundidade de 20-40 cm, a resistência a penetração desses tratamentos foi superior a 2 MPa, considerado alto, com o tratamento L aproximando-se de 3 MPa e L+U ultrapassando os 3,5 MPa, o que torna limitante o desenvolvimento radicular.

Figura 2- Resistência do solo à penetração na profundidade de 0-40 cm

Legenda: Tratamentos: U (ureia); L (leguminosas); L + U (leguminosas + ureia); Ca + L (cálcio + leguminosas); Si + L (silício + leguminosas); Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); Si + L + U (silício + leguminosas + ureia); Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). **Umidade do solo:** U- 9,1%; L- 14,3%; L+U- 7,2%; Ca+L- 9,3%; Si+L- 10,8%; Ca+L+U- 8,8%; Si + L + U- 8,9%, Ca + Si+ L + U- 12%. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste LSD ($p < 0.05$). CV=21,44%.

A combinação dos cátions polivalentes com a biomassa e a ureia (Ca+Si+L+U) resultou em uma produtividade média de 6.566 kg ha^{-1} (Figura 3). Enquanto isso, a produtividade nos tratamentos Ca+L, L e U foram abaixo de 4.000 kg ha^{-1} . Assim, o tratamento Ca+Si+L+U obteve a produtividade ($p=0,004$) em 84% e 88% em relação aos tratamentos U e Ca+L, respectivamente. Além disso, a produtividade em Si+L+U foi 33,8% maior em comparação com L+U, 41,2% maior em relação a Si+L e 36,9% maior em comparação com Ca+L+U.

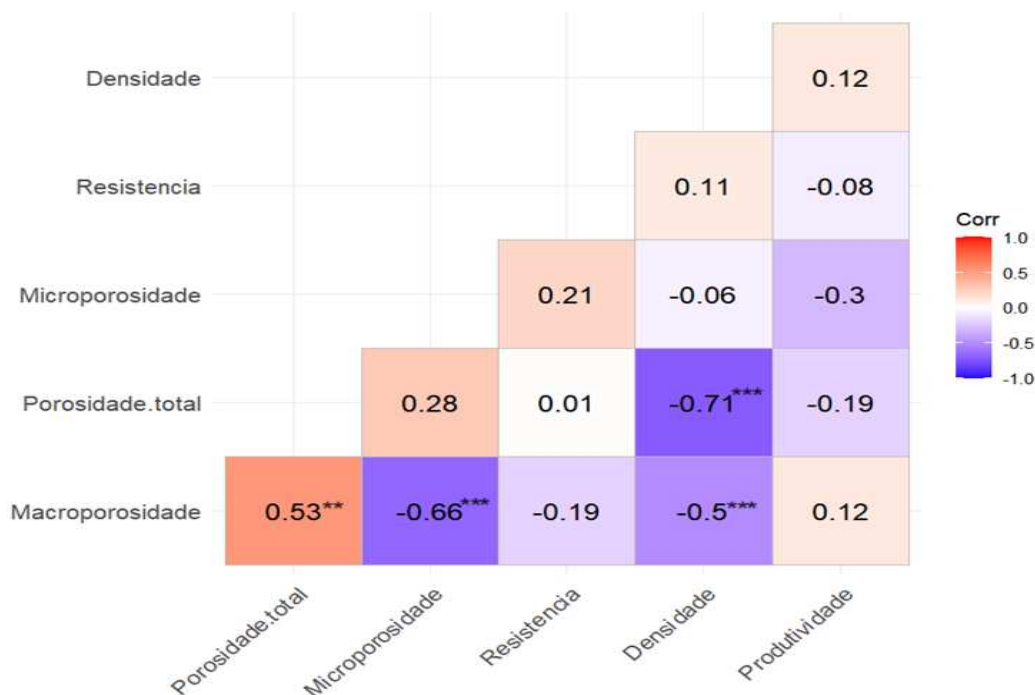
Figura 3- Produtividade média (kg/ha⁻¹) de milho (*Zea Mays*) em solo submetido a aplicação de biomassa, cátions e ureia.



Legenda: Tratamentos: U (ureia); L (leguminosas); L + U (leguminosas + ureia); Ca + L (cálcio + leguminosas); Si + L (silício + leguminosas); Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); Si + L + U (silício + leguminosas + ureia); Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste LSD ($p < 0.05$) CV= 28,82%.

Observa-se uma forte correlação negativa (-0,71) entre a porosidade total e a densidade do solo, o que indica que à medida que a porosidade total aumenta, a densidade do solo tende a diminuir. Além disso, é possível identificar uma correlação negativa moderada (-0,5) entre a macroporosidade e a densidade do solo. Notamos também uma correlação positiva moderada (0,53) entre a macroporosidade e a porosidade total do solo.

Figura 4- Correlação de Pearson entre as propriedades físicas do solo e a produtividade do milho



Legenda: Cores frias representam correlação positiva e cores quentes representam correlações negativas com base no teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$). Os asteriscos indicam correlações significativas de: *: $p = 0,05$; **: $p = 0,01$; ***: $p = 0,001$.

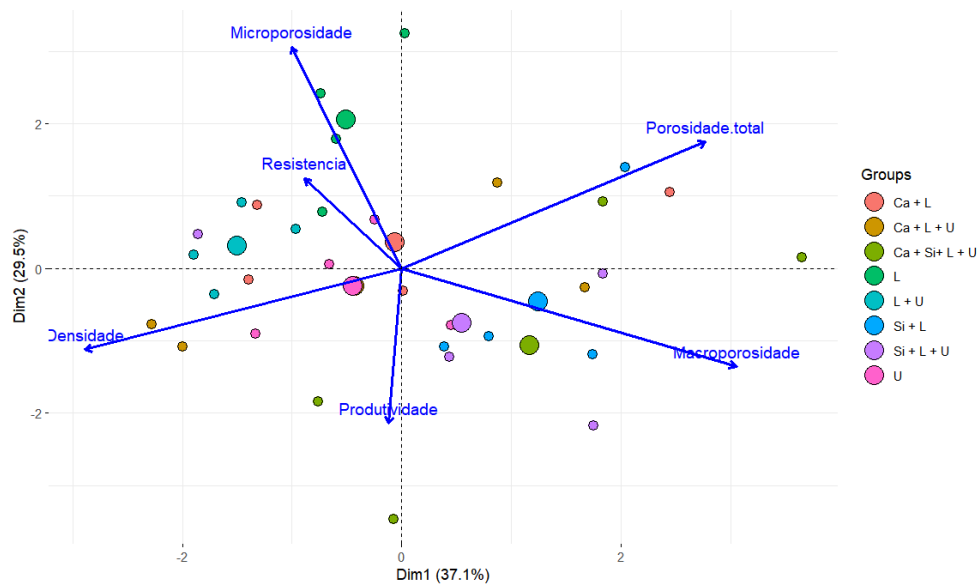
Na análise de componentes principais (ACP), identificamos que os dados podem ser agrupados em quatro conjuntos distintos, conforme mostrado na Figura 4. Cada grupo apresenta combinações específicas das variáveis estudadas.

Os dois primeiros eixos da PCA juntos explicaram 66,6% da variância total dos dados, sendo o eixo 1 responsável por 37,1% e o eixo 2 por 29,5%. A Dimensão 1 é principalmente influenciada pela densidade do solo, macroporosidade e porosidade total, enquanto a Dimensão 2 é influenciada pela microporosidade e produtividade.

Ao observarmos as contribuições individuais para cada eixo, notamos que a macroporosidade do solo teve o maior impacto no eixo 1 (34,36%), seguida pela densidade (30,69%) e porosidade total (28,29%), enquanto a produtividade contribuiu minimamente (0,05%). No eixo 2, a microporosidade foi a variável com maior contribuição (43,19%), seguida pela produtividade (21,24%), e a densidade do solo teve a menor contribuição (5,80%).

Observamos também, que a associação entre cálcio (Ca) e silício (Si) está correlacionada com os tratamentos com menores densidades de solo e maiores produtividades.

Figura 5- Análise dos componentes principais das propriedades físicas do solo e produtividade do milho



Legenda: Tratamentos: U (ureia); L (leguminosas); L + U (leguminosas + ureia); Ca + L (cálcio + leguminosas); Si + L (silício + leguminosas); Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); Si + L + U (silício + leguminosas + ureia); Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia).

6 DISCUSSÃO

Os resultados deste experimento sugerem que a combinação de cátions polivalentes com a biomassa de leguminosas resultou em maior macroporosidade em comparação aos tratamentos que utilizaram apenas leguminosas e/ou ureia. Considerando o valor crítico de macroporosidade de 10% (Amaro Filho *et al.*, 2008), todos os tratamentos possuem uma porcentagem de macroporos acima desse valor, exceto os tratamentos com apenas leguminosas (L) e leguminosas mais ureia (L+U), que tem macroporosidade de 9,42% e 9,07%, respectivamente. De acordo com Silva *et al.* (2004), para garantir um fluxo adequado de trocas gasosas e condições ideais de aeração para o desenvolvimento das plantas, são necessários pelo menos 10% de macroporos.

Em contrapartida, quando se utilizou somente leguminosas, a microporosidade foi significativamente maior em relação aos demais tratamentos, exceto Ca+L e L+U. A redução de 12,28% na microporosidade quando se utilizou somente ureia, reforça o pensamento de Bronick e Lal (2005) que relatam a importância da biomassa de leguminosas na manutenção da estrutura porosa do solo. A presença de MOS desempenha um papel fundamental na alteração da distribuição do tamanho dos poros de solos franco-arenosos (Robin *et al.*, 2018). O aumento do número de pequenos poros e a maior área superficial específica aumentam a capacidade de retenção de água em baixas tensões, como a capacidade de campo, e aumenta a disponibilidade de água para as plantas (Moura *et al.*, 2009).

Nesse sentido, sugere-se que as melhorias observadas na macroporosidade do solo nos tratamentos que utilizaram Ca e Si podem ser explicadas por meio de interações específicas entre esses cátions polivalentes e compostos derivados da decomposição de resíduos de leguminosas (Ellerbrock e Gerke, 2018). Os cátions polivalentes interagem com grupos funcionais da MOS formando pontes catiônicas, levando à relativa estabilização da MOS (Moore e Turunen, 2004). A interação entre os cátions polivalentes e grupos funcionais da matéria orgânica com carga negativa não são facilmente reversíveis, e as superfícies de materiais orgânicos serão menos acessíveis para atividade microbiana, o que leva a estabilização (Whittinghill e Hobbie, 2012).

Conforme evidenciado pelos resultados deste estudo, o silício exerce um papel importante na porosidade do solo, visto que a maior macroporosidade foi encontrada nos tratamentos que continham esse componente (Si+L; Si+L+U e Ca+Si+L+U).

Em um estudo conduzido na mesma área experimental (Pimentel, 2024), observou-se que o silício também desempenhou um papel significativo no acúmulo total de carbono orgânico no solo

(COT). O aumento do COT no tratamento com silício e leguminosas pode ser explicado pelo mecanismo que promove interações positivas entre o silício, o crescimento de microrganismos e a produção de biomassa de alta qualidade (Pati *et al.*, 2016; Neu *et al.*, 2017).

Estudos recentes também demonstraram a capacidade do silício de regular a estabilização do COS (Matus *et al.*, 2014; Parr e Sullivan, 2014; Huang *et al.*, 2016), pois o Si biogênico possui uma estrutura multiporosa que facilita a adsorção do COS, reduzindo sua exposição a microrganismos e enzimas (Zhaoliang *et al.*, 2018). Níveis elevados de carbono orgânico no solo promovem a agregação e aumentam o espaço total de poros, geralmente resultando na redução da resistência à penetração (RP) (Whittinghill e Hobbie, 2012).

Neste experimento, as interações entre os cátions polivalentes e a biomassa mantiveram a RP dentro da faixa moderada, enquanto os tratamentos sem cátions, especialmente L+U, ultrapassaram 3 MPa em profundidade, limitando o desenvolvimento radicular. Silva, Tormena e Imhoff (2002) relatam que valores acima de 2,0 MPa de resistência à penetração do solo têm sido associados a condições impeditivas para o crescimento das raízes. Dessa forma, a combinação de cátions e leguminosas mostrou-se eficaz na redução da RP em comparação com a utilização de biomassa isolada (tratamento L), o que evidencia a importância dos cátions básicos (cálcio e silício) na melhoria da estrutura do solo, conforme destacado no estudo de Campos *et al.*, (2015). Assim, infere-se que a menor RP nos tratamentos Ca+Si+L+U e Si+L+U, em comparação com L+U, possivelmente atribuiu melhorias na capacidade de enraizamento do solo como resultado das interações de Ca, Si e N. O solo poroso reduz a resistência à penetração das raízes, permitindo às plantas explorarem mais eficientemente o volume disponível em busca de nutrientes e favorecendo uma maior eficiência na absorção e taxa de crescimento das culturas (Nora *et al.*, 2014).

Além disso, a influência da biomassa e cátions polivalentes mostrou ser significativa quanto à produtividade da cultura do milho, como no tratamento Ca+Si+L+U, que obteve maior produtividade. Assim também, o Si+L+U apresentou produtividade 33,8% maior em comparação com leguminosa + ureia. Logo, a inclusão de cátions polivalentes, especialmente o silício, foi determinante para o aumento da produtividade. Apesar de não ser considerado essencial às plantas, estudos relacionam a aplicação do silício ao solo com o crescimento e aumento da produtividade das culturas, principalmente em espécies gramíneas consideradas acumuladoras de silício (Castro, 2009). Portanto, estes resultados sugerem que a disponibilidade desses cátions polivalentes, principalmente o Si, pode ter um impacto positivo na produtividade das culturas e que em combinação com o uso de resíduos de leguminosas, promove um melhor desenvolvimento das plantas e uma maior produção de grãos de milho.

A análise dos componentes principais das propriedades físicas do solo e produtividade do milho destacou a importância da macroporosidade, densidade do solo e porosidade total na variação dos dados, com a macroporosidade a variável mais influente (Oliveira *et al.*, 2008). Essas características foram cruciais na diferenciação dos tratamentos, especialmente evidente nos agrupamentos onde o tratamento que utilizou somente ureia se associou a uma maior densidade do solo, conforme revelado na ACP. Além disso, a contribuição significativa da microporosidade e produtividade no segundo eixo da ACP sugere que melhorias na estrutura física do solo, incluindo a promoção de uma aeração adequada, são fundamentais para otimizar a produtividade das culturas (Lal, 2020). Adicionalmente, há uma correlação entre a presença de cálcio (Ca) e silício (Si) nos tratamentos que apresentam menores densidades de solo e maiores produtividades, sugerindo uma possível relação entre esses nutrientes e condições favoráveis para o crescimento das plantas.

Esses resultados reforçam que os atributos físicos do solo são determinantes para o potencial produtivo e a manutenção da qualidade do solo a longo prazo (Lal, 2009). Vale ressaltar que os efeitos da cobertura morta a curto e longo prazo são cumulativos, influenciando tanto a estrutura do solo quanto a disponibilidade de nutrientes para as plantas. As correlações observadas entre os parâmetros físicos do solo e a produtividade confirmam a importância de uma abordagem integrada para a gestão sustentável do solo, enfatizando a necessidade de práticas de manejo que promovam interações positivas entre nutrientes e estrutura do solo.

7 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo mostram que a adição de cátions polivalentes combinados com biomassa de leguminosas e ureia impacta positivamente a macroporosidade do solo e produtividade do milho, embora não tenha alterado significativamente a densidade e porosidade total. A análise de componentes principais destacou a macroporosidade como a variável de maior influência na estrutura do solo, enquanto a microporosidade se correlacionou com a produtividade.

A combinação de leguminosas, cátions e ureia propiciou a maior produtividade e qualidade do solo. Assim, essa combinação pode ser uma estratégia eficaz para o manejo sustentável de solos tropicais, o que pode trazer benefícios tanto para a qualidade do solo quanto para a produtividade agrícola.

REFERÊNCIAS

- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Física do Solo: Conceitos e Aplicações. 1.ed. Fortaleza: UFC, 2008. 290p.
- ANIKWE, M. A. N.; EZE, J. C.; IBUDIALO, A. N. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. **Soil Tillage Res.**, v. 158, p. 32–38, 2016.
- ARROBAS, M., CLARO, A. M., FERREIRA, I. Q., & RODRIGUES, M. A. **Disponibilidade de fósforo no solo após o cultivo de leguminosas herbáceas no olival.** In VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. SECH.2013
- AWE, G.O.; REICHERT, J.M.; WENDROTH, O.O. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, [S.l.], v. 146, p. 235-244, 2015.
- BALBINOT Jr, A.; BACKES, R.; ALVES, A.; OGLIARI, J.; FONSECA, J. **Contribuição de componentes de rendimento na produtividade de grãos em variedades de polinização aberta de milho.** *Current Agricultural Science and Technology*, v.11, n.2, 2005.
- BORGES, E. N. *et al.* Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 35, n. 202, p. 553-568, 1988.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, 124(1-2), 3-22.2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706104000898> Acesso em: 13 jul. 2024.
- CAMPOS, A. G; RAMOS, M. C. P.; PRETO, V. R. O.; OLIVEIRA, M. F.; SILVA, B. M.; FREITAS, D. A. F. **Resistência à penetração como indicadora de alterações estruturais no solo decorrentes de implementos para manejo do solo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, XXXV. Natal-RN. 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/138563/1/Resistencia-penetracao.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2024.
- CASTRO, G.S.A. Alterações físicas e químicas do solo em função do sistema de produção e da aplicação superficial de silicato e calcário. 2009, 160f. Dissertação (Mestrado em agricultura) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2009.
- COTRUFO, M.F., LAVALLEE, J. M. Chapter One - Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. Em: Sparks, D.L. (org.) **Advances in Agronomy**. p. 1–66. Academic Press, 2022.
- DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of Soil Analysis**. Part 4: Physical Methods. 5. ed. Madison: Soil Science Society of America, p.1692. 2002.
- DANIELSON, R. E.; EUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods**. Part 1. Madison: Soil Science Society of America, p. 443–461. 1986.

DE ALMEIDA, BRIVALDO GOMES *et al.* **Porosidade**. 2017.

DEXTER, A. R., CZYŻ, E. A., RICHARD, G., RESZKOWSKA, A. A. User-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, v. 143, p.243–253, 2008.

ELLERBROCK, R. H., GERKE, H. H. Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 181, 721–736, 2018.

FERREIRA, C. R. **Indicadores da qualidade do solo em uma cronossequência sob sistema plantio direto em Guaíra - PR**. 91 f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2016.

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. In: JONG VAN LIER, Q. (Ed.). Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-27. 2010.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. **Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional**. Ilha Solteira, SP: Engenharia Agrícola. v. 26, n. 1, p. 113-121. 2006.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. D.; TORMENA, C.; SOUZA, L. D. S.; RIBEIRO, L. D. P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25, 239-247, 2001.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo Argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Porto Alegre, RS, v. 28, n. 4, p. 1234-1244, 2014.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; CLARKE TOPP, G. (Eds.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, Pt. 4, p. 201-228. (Book series, 5). 2002.

GURGEL, A. L. C. **Interação solo-planta-animal em pastos de capim-mombaça sob efeito residual do nitrogênio**. 56f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2019.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Tillage Res.**, v. 53, p. 71-85, 2000.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.

HUANG, YU-TUAN; LOWE, DAVID J.; CHURCHMAN, G. JOCK; PICADOR, LUÍS A.; CURSONS, RAY; ZHANG, HENG; CHEN, TSAN-YAO; COOPER, ALAN. Adsorção de DNA por esférulas e nanoagregados de alofanos nanocristalinos e implicações para o sequestro de carbono em andisolos. **Ciência da Argila Aplicada**, v. 120, p. 40-50, 2016.

- KADER, M. A.; NAKAMURA, K.; SENGE, M.; MOJID, M. A.; KAWASHIMA, S. Numerical simulation of water- and heat-flow regimes of mulched soil in rain-fed soybean field in central Japan. **Soil Tillage Research.**, v. 191, p. 142–155, 2019.
- KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, Amsterdam, v. 154, p. 398-406. 2010.
- KHDAIR, A. I.; KHDAIR, S. I.; ABU-RUMMAN, G. A. Dataset on some soil properties improvement by the addition of olive pomace. **Data in Brief, Amsterdam**, v. 24, 103-878. 2019.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.
- LAL, R. Managing organic matter content for restoring health and ecosystem services of soils of India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 68(1), 1-15, 2020.
- LAL, R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. **Food Security**, v.1, p. 45-57. 2009.
- LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. C.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 217-223. 2006.
- LUNA, L.; MIRALLES, I.; ANDRENELLI, M. C.; GISPERT, M.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI, N.; SOLÉ-BENET, A. **Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region**. CATENA, [S.l.], v. 143, p. 256-264, ago. 2016.
- MALTAS, A.; KEBLI, H.; OBERHOLZER, R. H.; RUDOLF, H.; WEISSKOPF, P.; SINAJ, S. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. **Land Degradation & Development, Chichester**, v. 29, n. 4, p. 926-938. 2018.
- MARQUES, G.E.C; AGUIAR, A.C.F.; MACEDO, V.R.A.; E.P.A.; MOURA, E.G. Nitrogen use and protein yield of two maize cultivars in cohesive tropical soil. **Journal of Agricultural Science**; v. 9, p. 3, 2017.
- MATUS, F.; RUMPEL, C.; NECULMAN, R.; PANICHINI, M.; MORA, M.L. Armazenamento de carbono no solo e estabilização em solos ândicos: uma revisão. *Catena*, 120, 102–110, 2014.
- MONTANARI, R.; PANACHUKI, E.; LOVERA, L. H.; CORREA, A. R.; OLIVEIRA, I. S.; QUEIROZ, H. A.; TOMAZ, P. K. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono Cerrado-Pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2015.
- MOORE, T.R., TURUNEN, J. Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 68, n.2, p. 690–696, 2004.

MOTA, J. C. A.; FREIRE, A. G.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Qualidade física de um Cambissolo sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1196-1206. 2013.

MOURA, E. D.; MOURA, N. G.; MARQUES, E. S.; PINHEIRO, K. M.; COSTA SOBRINHO, J. R. S.; AGUIAR, A. C. F. Evaluating chemical and physical quality indicators for a structurally fragile tropical soil. *Soil Use and Management*, 25(4), 368-375, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00238.x>.

MOURA, E. G. *et al.* **Identifying indicators in a structurally fragile tropical soil to recommend management practices and prevent land degradation in the Amazonian periphery**. 2020.

MOURA, E. G.; MARQUES, E. S.; SILVA, T. M. B.; PIEDADE, A.; AGUIAR, A. C. F. Interactions among leguminous trees, crops and weeds in a no-till alley cropping system. **International Journal of Plant Production**, v. 8, p. 441-456, 2014.

MOURA, E. G.; MONROE, P. H. M.; COELHO, M. J. A.; COSTA SOBRINHO, J. R. S.; AGUIAR, A. C. F. **Effectiveness of calcined rock phosphate and leucaena prunings as a source of nutrients for maize in a tropical soil**. **Biological Agriculture & Horticulture: An International Journal for Sustainable Production Systems**, 2013.

MOURA, E. G.; PORTELA, S. B.; MACEDO, V. R. A.; SENA, V. G. L.; SOUZA, C. C.M.; AGUIAR, A. C.F. Gypsum and Legume Residue as a Strategy to Improve Soil Conditions in Sustainability of Agrosystems of the Humid Tropics. **Sustainability**, v.10, p .1006, 2018.

NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E.G. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) *Sci Rep*, 7:40829, 2017.

OLIVEIRA FILHO, F. X. L.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 2, p. 186-193, fev. 2015.

OLIVEIRA, L. B. de; FERREIRA, T. O.; OLIVEIRA, T. S. de; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Análise multivariada de atributos físicos, químicos e biológicos de solos em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2015-2028, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500015>. Acesso em: 13 jul. 2024.

PARR, JEFFREY; SULLIVAN, LEIGH; CHEN, BIHUA; BEM SIM, VAI; ZHENG, WEIPENG. Bio-sequestro de carbono dentro dos fitólitos de espécies econômicas de bambu. *Biologia da Mudança Global*, v. 16, n. 10, p. 2661-2667, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02118.x>.

PATI, S.; PAL, B.; BADOLE, S.; et al. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. *Commun Soil Sci Plan Anal*. 47(3):284–290, 2016.

PIMENTEL, Karina Andrade. **Soluções baseadas na natureza para condução de agrossistemas tropicais regenerativos**. 2024. Monografia (Graduação em Agronomia – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2024).

QUESADA, C. A. et al. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *Soil*, 6, 53–88, 2020.

RAMOS, F.T. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. *J. Sci. Food Agric.* 98, 3595–3602, 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

REICHERT, J. M.; PEIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade da soja em várzea sistematizada: Análise geoestatística e de regressão. *Ciência Rural, Santa Maria*, v. 38, n. 4, p. 981-988, 2008.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L. E.A.S; HORN, R. **Mecânica do Solo**. In: LIER, Q.de J. van. Física do Solo. Viçosa: SBCS, 2010.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 316-330. 2007.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; TAN, C. S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma, Amsterdam**, v. 146, n. 3-4, p. 466-474, 2008.

RIZZARDI, M. A.; WITECK, D.; DEGGERONE, I. **Rendimento de grãos e componentes do rendimento de cultivares de milho em duas épocas de semeadura**. *Ciência Rural*, v.24, p.477-482, 1994.

ROBIN, P.; MOREL, C.; VIAL, F.; LANDRAIN, B.; TOUDIC, A.; LI, Y.; AKKAL-CORFINI, N. Effect of Three Types of Exogenous Organic Carbon on Soil Organic Matter and Physical Properties of a Sandy Technosol. *Sustainability*, 10(4), 1146, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10041146>.

SENA, V. G. L. **Melhoria dos indicadores físicos de um argissolo coeso por meio da aplicação de gesso e biomassa de leguminosas arbóreas**. Tese (Doutorado). Curso de Agroecologia, Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

SENA, V.G. *et al.* Serviços ecossistêmicos para intensificação da agricultura, com ênfase no aumento da eficiência do uso ecológico do nitrogênio. **Ecosfera**, v. 11, n. 2, 2020.

SIGNOR, D.; DEON, M. D.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. E. P. **Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under**. *Sci. Agric.*, v.75, n.3, p.225-232, 2018.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002.

SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; KAY, B.D. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no tillage system. *Sci. Agric.*, 61:451-456, 2004.

SILVA, T. A. C. *et al.* Avaliação da qualidade de solo de área de lixão desativado: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 630-640, 2020.

STOLF, R.; THURLER, A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 447-459. 2011.

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; VIEIRA, D. M. S. Alterações nos atributos físicos do solo em função da irrigação e do pastejo rotacionado. **Irriga**, v.18, n.3, p.558-571, 2013.

VON LÜTZOW, M. *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions. **European Journal of Soil Science**, 57, 426–445, 2006.

WANG, B.; LIANG, C.; YAO, H.; YANG, E.; AN, S. **The accumulation of microbial necromass carbon from litter to mineral soil and its contribution to soil organic carbon sequestration**. CATENA, v. 207, 2021.

WHITTINGHILL, K.A., HOBBIE, S.E. Effects of pH and calcium on soil organic matter dynamics in Alaskan tundra. **Biogeochemistry** 111 (1–3), 569–581, 2012.

WUDDIVIRA M. N.; CAMPS-ROACH, G. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *Eur. J. Soil Sci.*, v. 58, p. 722–72, 2007.

ZHAOLIANG, LIU, C., MÜLLER, K., YANG, X., WANG, H. L. Regulação do silício na estabilização do carbono orgânico do solo e seu potencial para mitigar as mudanças climáticas. **Resenhas de Ciências da Terra**, v. 185, p. 463-475, 2018.