

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM AGROECOLOGIA

GABRIELLY SOARES DIAS GONÇALVES

**INDICADORES QUE DETERMINAM O AUMENTO DA FRAÇÃO ESTÁVEL DA
MATÉRIA ORGÂNICA E A MANUTENÇÃO DE CÁTIOS BÁSICOS**

São Luís - MA

2023

GABRIELLY SOARES DIAS GONÇALVES

Licenciada em Ciências Naturais - Biologia

**INDICADORES QUE DETERMINAM O AUMENTO DA FRAÇÃO ESTÁVEL DA
MATÉRIA ORGÂNICA E A MANUTENÇÃO DE CÁTIONS BÁSICOS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, para obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura.

Coorientadora: Dra. Katia Pereira Coelho.

São Luís - MA

2023

Gonçalves, Gabrielly Soares Dias.

Indicadores que determinam o aumento da fração estável da matéria orgânica e a manutenção de cátions básicos./ Gabrielly Soares Dias Gonçalves. – São Luís (MA), 2023.

60p.

Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura.

Coorientadora: Profa. Dra. Katia Pereira Coelho.

1. Cálcio. 2. Silício. 3. Carbono Orgânico do Solo. 4. Biomassa de Leguminosas .
5. Nutrição Nitrogenada. I. Título.

CDU: 54-128.4

Elaborado por Luciana de Araújo - CRB 13/445



Uema
UNIVERSIDADE ESTADUAL
DO MARANHÃO



Universidade Estadual do Maranhão
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Agroecologia

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos **17** dias do mês de **novembro** de **2023**, às **09:00 h**, compareceu ao Auditório do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia/PPGA/UEMA, a aluna **Gabrielly Soares Dias Gonçalves** em nível de Mestrado, para apresentar e defender a dissertação intitulada **“INDICADORES QUE DETERMINAM O AUMENTO DA FRAÇÃO ESTÁVEL DA MATÉRIA ORGÂNICA E A MANUTENÇÃO DE CÁTIOS BÁSICOS”**, perante a Banca Examinadora abaixo relacionada. Após a apresentação do trabalho e arguição pelos membros da Banca, a **aluna foi considerada:**

- (x) APROVADA
() REPROVADA

MEMBROS DA BANCA	FUNÇÃO	Assinatura
		NOME COMPLETO
Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura	Presidente	
Profa. Dra. Camila Pinheiro Nobre	Membro	
Prof. Dr. Marlon Gomes da Costa	Membro	

Encerrados os trabalhos, a Coordenação do Programa lavrou a presente ATA que, após lida e aprovada, recebeu a assinatura dos membros da Banca Examinadora.

São Luís (MA), **17 de novembro** de **2023**.

Formulário de Ata de Defesa PPGA/UEMA

Ao meu amado e saudoso pai, Sebastião
Domingos Dias Filho (*in memoriam*),
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradecer é um ato de humildade e reconhecimento perante a todas as coisas que perpassam a nossa existência. Nestas breves linhas, deixo meus sinceros agradecimentos a cada pessoa que direta e indiretamente me estendeu auxílio, conversas, incentivo e atenção. Cada experiência vivenciada ao longo desse período, foi guardada na memória da minha alma com carinho e eterna gratidão.

Dito isso, agradeço imensamente ao Pai celeste, causa primeira de todas as coisas, criador do céu e do universo. Deus soberanamente bom e justo. Sentir o agir dessa força sobrenatural só aumentou a minha fé no impossível.

Agradeço a minha família, meu marido Joerbed; minha amada mãe, Adagilda; meus irmãos, Adrielle, Neilson, Pedro e Lívia; meu sobrinho João Miguel e aos meus avós paternos, Maria Emília e Sebastião. Como sou agraciada por ter essa fortaleza ao meu redor, vocês me cobrem de força e determinação. Foi esse amor que me trouxe até aqui.

Com uma saudade imensa, agradeço ao meu pai, Sebastião (*in memoriam*). Como é difícil superar uma perda, mas saber que iremos nos reencontrar no plano espiritual me dá energia para levantar todos os dias e viver. Sonhamos juntos muitas coisas e elas estarão só nas lembranças, porém jamais deixarei de lhe honrar, onde quer que esteja.

Deixo meus agradecimentos de todo meu coração ao meu grupo de pesquisa, Dyanne, Edaciano, Jéssica e Vanessa; vocês foram essenciais para que a nosso trabalho tivesse êxito. Obrigada pelo companheirismo e empatia.

Agradeço a Universidade Estadual do Maranhão, ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e a Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão pelo apoio logístico, didático e financeiro.

Além disso, agradeço imensamente ao Neto, Gustavo e a Rayanne, pessoas com quem aprendi muito a partir do convívio no prédio da Agroecologia.

Meu muito obrigada a todos os meus professores, profissionais excelentes. Com vocês tive as melhores aulas da minha vida e com certeza foi uma experiência ímpar conviver nesse ceio de tantos conhecimentos.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Emanuel e também à minha coorientadora, Dra. Kátia por todas as contribuições singulares não só para o meu trabalho, mais também para minha vida.

A vocês e aqueles que não foram citados nominalmente, meu **MUITO OBRIGADA**.

“Porque o progresso é filho do trabalho, e o trabalho coloca em ação as forças da inteligência.”

(Allan Kardec)

RESUMO

No trópico úmido, a maioria dos solos apresenta baixa fertilidade natural. A agricultura dessa região enfrenta vários desafios, tais como: preservar a paisagem e a biodiversidade, contribuir para a diminuição do CO₂ na atmosfera, reduzir a pobreza e, promover a segurança alimentar das famílias agricultoras. Assim, avaliamos os efeitos da adição de biomassa de leguminosas com e sem a aplicação de Ca, Si e ureia, sobre o teor de carbono orgânico no solo, e no teor de N na planta e produtividade de milho. O experimento foi conduzido no período de outubro de 2021 a março de 2023 na Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil. O delineamento experimental foi estabelecido em blocos casualizados (DBC), quatro repetições e oito tratamentos. Os tratamentos constituíram arranjos de leguminosas com cálcio, silício e ureia. Os resultados evidenciam que o Ca apresenta forte relação com o COAM. As variáveis Si e COT, demonstram a eficácia da aplicação de cátions polivalentes no aumento das concentrações de carbono no solo. A produtividade apresentou correlação positiva com o COAM, Si, e Ca. Assim, estratégias e manejos como o realizado nesta pesquisa, podem auxiliar futuramente o trópico úmido a estocar carbono e manter índices elevados de produtividades.

Palavras-chave: Cálcio. Silício. Carbono Orgânico do Solo. Biomassa de Leguminosas. Nutrição Nitrogenada.

ABSTRACT

In the humid tropics, most soils have low natural fertility. Agriculture in this region faces several challenges, such as: preserving the landscape and biodiversity, contributing to the reduction of CO₂ in the atmosphere, reducing poverty and promoting food security for farming families. Thus, we evaluated the effects of adding legume biomass with and without the application of Ca, Si and urea, on the organic carbon content in the soil, and on the N content in the plant and corn productivity. The experiment was conducted from October 2021 to March 2023 at the State University of Maranhão, São Luís, Maranhão, Brazil. The experimental design was established in randomized blocks (DBC), four replications and eight treatments. The treatments consisted of arrangements of legumes with calcium, silicon and urea. The results show that Ca has a strong relationship with COAM. The variables Si and TOC demonstrate the effectiveness of the application of polyvalent cations in increasing carbon concentrations in the soil. Productivity showed a positive correlation with COAM, Si, and Ca. Therefore, strategies and management such as the one carried out in this research can help the humid tropics to store carbon and maintain high productivity rates in the future.

Keywords: Calcium. Silicon. Soil Organic Carbon. Legume Biomass. Nitrogenated Nutrition.

LISTA DE SIGLAS

C	Carbono
Ca	Cálcio
CFP	Carbono da Fração Particulada do Solo
CO ₂	Dióxido de carbono
COAM	Carbono Orgânico Associado aos Minerais
COP	Carbono Orgânico Particulado
C-org	Carbono Orgânico
COS	Carbono Orgânico do Solo
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca De Cátions
DAP	Diâmetro à altura do peito
DBC	Blocos Casualizados ao Acaso
DMP	Diâmetro Médio Ponderado
DP	Desvio Padrão
ECE	Eventos Climáticos Extremos
EUC	Eficiência do uso do carbono
FBN	Fixação Biológica de Nitrogênio
FDA	Fibra em detergente ácido
FDN	Fibra em detergente neutro
GEE	Gases do Efeito Estufa
L	Leguminosa
MAP	Fosfato monoâmico
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
PB	Proteína Bruta
PCA	Análise dos Componentes Principais
PF	Frações Particuladas
SBC	Soma de Cátions Básicos
Si	Silício
U	Ureia

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no teor de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico total (COT) em solo coeso. São Luís, MA, 2023. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro representam o desvio padrão. 45
- Figura 2:** Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no estoque de carbono em solo coeso. São Luís, MA, 2023. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro representam o desvio padrão. 45
- Figura 3:** Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no teor de Ca e Si em solo coeso. São Luís, MA, 2023. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro representam o desvio padrão. 46
- Figura 4:** Análise de componentes principais com as variáveis teor de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico total (COT), Ca e Si nas profundidades de 0-10 e 10 a 20 cm, e porcentagem de macroagregados (Mac) e microagregados (Mic), diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e produtividade de grãos de milho (PG), avaliados em solo coeso após aplicação de biomassa de leguminosas com e sem Ca, Si e ureia. São Luís, MA, 2023. 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades químicas e físicas do solo utilizado no experimento na profundidade de 0-10 cm.	40
Tabela 2: Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, na formação de agregados do solo. São Luís, MA, 2023.	47
Tabela 3: Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no acúmulo de N no caule e nas folhas, no número de grãos/metro e na produtividade de milho. São Luís, MA, 2023.....	48
Tabela 4: Valores de P da análise de correlação de Pearson entre as variáveis.	51

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
CAPÍTULO I	16
REFERENCIAL TEÓRICO	16
1 REFERENCIAL TEÓRICO	17
1.1 O Recurso Solo	17
1.2 A Agricultura e as Mudanças Climáticas	19
1.3 Matéria Orgânica do Solo	22
1.4 Cátions Polivalentes	25
1.4.1 Silício	25
1.4.2 Cálcio	26
1.5 Biomassa vegetal	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
CAPÍTULO II	37
1 INTRODUÇÃO	38
2 MATERIAL E MÉTODOS	40
2.1 Caracterização da área	40
2.2 Descrição do experimento	40
2.2.1 Análise da Matéria Orgânica do Solo	41
2.2.3 Nitrogênio foliar	42
2.2.4 Análise dos cátions polivalentes	42
2.2.5 Componentes de Produtividade	42
2.3 Análises Estatísticas	43
3 RESULTADOS	44
3.1 Efeitos da aplicação combinada de Ca, Si, ureia e biomassa de leguminosas sobre o carbono orgânico e os teores de Ca e Si no solo	44
3.2 Efeitos da aplicação combinada de Ca, Si ureia e biomassa de leguminosas sobre os agregados do solo	47
3.3 Efeitos da aplicação combinada de Ca, Si, ureia e biomassa de leguminosas sobre o acúmulo de N na planta e produtividade de milho	48
4 DISCUSSÃO	52
5 CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57

INTRODUÇÃO GERAL

A intensificação da agricultura é conduzida pela combinação de três tendências globais: i) o crescimento da população; ii) a mudança no hábito alimentar de países populosos e iii) as pressões sobre as áreas agrícolas devido à concorrência com a urbanização e com a produção de fibras e combustíveis (Hochman *et al.*, 2011). Paralelo a isso, a intensificação ecológica da agricultura (IEA) fundamenta-se na redução da dependência de recursos não renováveis com o intuito de manter a fertilidade do solo e a biodiversidade. A abordagem da IEA tem sido proposta como o principal meio para alimentar uma população em crescimento e diminuir os impactos ao meio ambiente (Godfray *et al.*, 2010).

No trópico úmido, a maioria dos solos apresenta baixa fertilidade natural, por serem derivados de rochas sedimentares clásticas (Aguiar *et al.*, 2010), além de apresentarem mineralogia de argila frequentemente dominada por caulinita e baixos teores de matéria orgânica (Moura *et al.*, 2008). Tais características são comuns em solos propensos à coesão e que geralmente estão sob condições climáticas de períodos secos e úmidos alternados (Bezerra *et al.*, 2015). Normalmente, esses solos endurecem quando secos, o que dificulta ou mesmo impossibilita o preparo para o cultivo, quando úmidos ocorre o contrário (Moura *et al.*, 2013). Essa alta propensão à coesão dificulta a enraizabilidade das plantas e diminui a eficiência do uso da água e dos nutrientes (Moussadek *et al.*, 2014).

Outra característica dos solos coesos são os baixos estoques de carbono e a baixa estabilidade de agregados (Tarkiewicz; Nosalewicz, 2005). Para Chaney e Swift (1984) existe alta correlação entre o aumento da matéria orgânica do solo (MOS) e a estabilidade de agregados. Assim, podem ser obtidas melhorias nas propriedades estruturais do solo com a aplicação (ou deposição) de biomassa vegetal (Blanco-Canqui; Lal, 2007). Todavia, estudos demonstram que os efeitos da biomassa vegetal nos atributos do solo não se estendem para além de 10 cm abaixo da superfície, o que não é suficiente para promover o crescimento das raízes e aumentar a eficiência do uso de nutrientes adequadamente (Wong, Asseng, 2007; Rahmani *et al.*, 2021).

Assim, a agricultura no trópico úmido enfrenta vários desafios, tais como: preservar a paisagem e a biodiversidade, contribuir para a diminuição do CO₂ na atmosfera, reduzir a insegurança alimentar, reduzir a pobreza e, promover a segurança alimentar das famílias agricultoras. Portanto, é importante identificar e se beneficiar das sinergias dos processos de aumento da fertilidade do solo, sequestro de carbono e sustentabilidade dos agroecossistemas

(Moura, 2021).

Desse modo, esta pesquisa teve como problemática os diversos obstáculos enfrentados em muitas regiões do trópico úmido, como a periferia amazônica, onde a sustentabilidade e viabilidade dos agroecossistemas são predominantemente dependentes do equilíbrio entre a entrada/saída de MOS e a manutenção de uma soma adequada de cátions básicos (SCB) na zona das raízes (Quesada *et al.*, 2020). Nessa região, a degradação do solo e, portanto, a inviabilidade dos agroecossistemas, ocorre quando as práticas de manejo do solo não conseguem superar as forças naturais que diminuem o conteúdo de MOS, devido à sua rápida decomposição, e reduzem o SCB devido à lixiviação rápida dos nutrientes do solo (Ramos *et al.*, 2018).

Na verdade, a degradação do solo nesta região só será evitada quando os desenhos dos agroecossistemas e as práticas de manejo do solo forem capazes de superar as forças tropicais e naturais que diminuem o conteúdo da matéria orgânica devido à sua rápida decomposição e, a soma dos cátions básicos do perfil do solo, por causa da alta taxa de lixiviação (Ramos *et al.*, 2018). O uso dos cátions polivalentes associados com a adubação nitrogenada e deposição de biomassa vegetal de alta qualidade é um dos mecanismos que pode auxiliar na estabilização da matéria orgânica no solo (Moura, 2021), e, portanto, desacelerar o processo de decomposição. Hipotetizamos que a aplicação de Ca e Si associada a adição de leguminosas e aplicação de ureia aumenta a estabilidade da MO e melhora a nutrição nitrogenada e produtividade de milho em solo coeso na periferia amazônica maranhense. Logo, avaliamos os efeitos da adição de biomassa de leguminosas com e sem a aplicação de Ca, Si e ou ureia, sobre o teor de carbono orgânico no solo, e no teor de N na planta e produtividade de milho.

CAPÍTULO I

REFERENCIAL TEÓRICO

1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 O Recurso Solo

A história evolutiva da humanidade, está associada ao período em que o homem primitivo descobre a importância do recurso solo para sua sobrevivência. Há cerca de trinta mil anos, os agrupamentos de humanos viam o solo apenas como um lugar onde caminhavam, recolhiam alimentos, obtinham barro para confecção de cerâmicas e pigmentos para suas pinturas rupestres (Lepsch, 2016). Com o passar do tempo, esse entendimento se modificou, o homem buscava áreas férteis para a produção de alimentos, sustento para suas tribos, e ambientes estáveis para construir suas cabanas (Silva *et al.*, 2023).

Exemplos disso foram as grandes civilizações antigas que se desenvolveram principalmente ao redor de grandes rios que fluíam em regiões de clima árido. No rio Tigre e Eufrates (antiga Mesopotâmia, hoje Síria e Iraque), Nilo (Egito) e planície Indo-Gangética (hoje Índia, Paquistão e Bangladesh) formaram o chamado “crescente fértil”, onde grandes civilizações prosperaram em solos ricos das planícies aluviais (várzeas); nestas áreas eram cultivados cevada, lentilha, trigo, linho e algodão (Kopitke *et al.*, 2019). O clima relativamente seco, fez com que surgisse a necessidade de sistemas de irrigação e, durante as longas estiagens, as terras eram irrigadas pelos sistemas de camais distribuidores de água, planejados e executados com os primeiros conhecimentos de engenharia e trabalho organizado (Mason *et al.*, 2023).

Após a Revolução Francesa (1789 – 1799), houve um grande progresso das ciências. A atenção dos cientistas europeus voltou-se à fertilidade do solo, já que produzir alimentos passou a ser necessidade vital. A medicina e as ciências afins alavancaram significativamente a cura de doenças, medicamentos e vacinas, além do crescimento populacional expressivo para época. Dessa maneira, foi necessário desenvolver métodos eficientes de plantio, para suprir a necessidade da população de famintos (Santos *et al.*, 2008).

Em 1840, o químico Justus Von Liebig descreveu em um dos seus experimentos que as plantas não se alimentavam propriamente de substâncias orgânicas, mas de elementos e compostos simples do solo, como a água e o gás carbônico (Brady; Weil, 2001). Em 1877, o naturalista russo Vasily V. Dokouchaev, ao comparar solos das planícies secas da Ucrânia e regiões úmidas e frias de floresta em Gorki no leste de Moscou, evidência que a singularidade desses solos é resultado da ação conjunta de diversos fatores sob condições completamente distintas (Nascimento, 2006). Assim, foi estabelecida a origem de uma nova ciência: a

Pedologia (Lima, 2007).

O solo possui limite entre a biosfera e a atmosfera. Lateralmente, ele pode passar para corpos d'água, rocha desnuda, gelo ou areais de praias costeiras ou dunas movediças. O limite inferior é mais difícil de ser estabelecido porque passa progressivamente à rocha ou material geológico em formação. Logo, ao se situar na interface entre a litosfera, biosfera, atmosfera e hidrosfera, outro nome para o conjunto de solos na Terra, é a pedosfera (Brady; Weil, 2001).

A pedosfera funciona como um alicerce da vida dos ecossistemas terrestres (Torres, 2011). As plantas precisam basicamente de energia solar, oxigênio, carbono e hidrogênio. Outrossim, para garantia de crescimento e reprodução saudável, as plantas absorvem em quantidades relativamente grandes, os chamados macronutrientes: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre (Camargo *et al.*, 2007).

Usados em quantidades pequenas, as plantas absorvem os micronutrientes: boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel, cobalto, zinco e sódio (Lepsch, 2010). Existem também os elementos considerados benéficos, como silício, selênio, entre outros. O silício, muitas vezes, é encontrado como nutriente, absorvido em quantidades elevadas por algumas vegetações, como gramíneas. Embora o oxigênio e o carbono estejam disponíveis no ar, outros nutrientes são obtidos na forma de íons dissolvidos na água retida pelo solo ao redor das raízes das plantas (Silva, 2010).

Assim, o solo funciona como meio de suporte para o crescimento das plantas, proporciona o ambiente onde as raízes podem crescer e fornece os nutrientes essenciais para o seu desenvolvimento. As propriedades do solo geralmente determinam a natureza da vegetação presente e, indiretamente, a quantidade e a diversidade de animais que essa flora sustenta (Brady; Weil, 2001). A parte aérea das plantas (caules, ramos, folhas e flores) é visível, porém, são as raízes que a sustentam através do solo. Nele, a planta encontra a sustentação física; ar; água; regulação de temperatura; proteção contra toxinas; elementos nutritivos etc. (Oliveira, 2011).

O solo esteia o sistema radicular das plantas, promove a estabilidade e propicia o seu crescimento. Para obtenção de energia, as plantas necessitam do processo de respiração, é aí que o solo tem sua atuação, na aeração – que possibilita a saída de CO₂ e a entrada de O₂ do ar fresco na rizosfera (aeração é feita pelo sistema de poros presente no solo). Os poros captam a água da chuva e retém-na para que ocorra absorção pelas raízes das plantas (Shaheb; Venkatesh; Shearer, 2021).

A capacidade de retenção de água no solo é primordial para a sobrevivência das plantas

(Khdairet *et al.*, 2019). Um solo profundo pode acumular água em quantidade suficiente para possibilitar que as plantas sobrevivam por longos períodos, mesmo em épocas de chuvas escassas. O solo também atua no controle da temperatura. A explicação para isso são as propriedades isolantes do solo (químicas e físicas) que protegem a parte mais profunda do sistema radicular das grandes oscilações de temperatura que ocorrem cada vez mais na superfície da Terra (Oliveira, 2010).

O solo é o regulador do abastecimento de água no planeta. Quando a água da chuva infiltra no solo, parte é armazenada e usada pelas plantas e, a outra parte pode infiltrar-se lentamente por entre as camadas do solo até alcançar os lençóis freáticos, ou por fim, emergir em mananciais (nascentes) que abastecem os rios e oceanos por meses ou anos na forma de fluxos de base (Pascual *et al.*, 2015). O solo possui também a capacidade de assimilar grandes quantidades de resíduos orgânicos transformado em húmus, que converte os nutrientes minerais em formas que podem ser usadas pelas plantas e animais, e devolve carbono para atmosfera na forma de dióxido de carbono, este por sua vez novamente irá se tornar parte dos organismos vivos por intermédio da fotossíntese das plantas (Lehmann *et al.*, 2020).

Por isso, eventualmente ao discutir sobre a proteção dos ecossistemas, há que se pensar na conservação e proteção do solo. Esse recurso não é um mero conjunto de fragmentos de rochas e resíduos orgânicos. Em uma fração de solo pode-se encontrar bilhões de seres vivos, pertencentes a milhares de espécies, que forma toda uma cadeia rica em vida. Os solos abrigam uma boa parte da complexa diversidade genética da Terra. Portanto, o solo é um ecossistema importante por si só.

1.2 A Agricultura e as Mudanças Climáticas

A interferência antropológica no clima aparece como fator preponderante na questão do aquecimento global notado em meados do século XX. A elevação da temperatura, resultante particularmente do aumento das concentrações de CO₂ atmosférico, no presente, já provocou alterações como as inundações, a intensificação das secas, e outros tipos de eventos extremos que proporcionaram a elevação do nível do mar e ameaçam a biodiversidade em escala global. Estas mudanças causam riscos sem precedentes para a continuidade da espécie humana, principalmente em populações mais vulneráveis (IPCC, 2018; Brevik, 2013).

Como resultado, as populações mais atingidas são as que vivem em países pobres ou em desenvolvimento, que frequentemente apresentam os menores índices de segurança alimentar, fato esse parcialmente ligado ao aumento da migração e da pobreza (IPCC, 2012). Regiões

costeiras, pequenas ilhas, altas cadeias de montanhas, e megacidades, estão entre as áreas mais afetadas (Albert *et al.*, 2018). Em escala global, diversos ecossistemas correm risco de impactos severos, especialmente recifes tropicais de água quente e ecossistemas do Ártico (IPCC, 2023).

Acredita-se que as mudanças climáticas podem afetar de forma negativa os ecossistemas, a segurança alimentar, e sistemas de produção alimentícia (Amelung *et al.*, 2020). A vista disso, é primordial se levar em conta os diversos meios adaptativos para os sistemas agrícolas frente à essas adversidades. A população global já ultrapassou à casa de 8 bilhões de pessoas no planeta (ONU, 2023). Logo, a demanda por produção de alimentos é enorme e mudanças são necessárias para a intensificação da agricultura e crescimento na produtividade; concomitante, deve-se ponderar a necessidade da conservação do meio ambiente (FAO, 2023).

Nessa perspectiva, a implementação de estratégias específicas para a produção de alimentos busca mitigar parcial ou significativamente os impactos negativos, resultado das mudanças climáticas, que são concernentes principalmente da área geográfica, clima e do tipo de cultura que são empregados (Wei *et al.*, 2019).

Recentes estudos validam que as mudanças climáticas examinadas já afetaram a implementação de culturas em muitas áreas, o que deriva em alterações na produção das principais culturas agrícolas. Tais impactos são visíveis em muitas áreas do mundo, desde a Ásia (Chen *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2019; He; Zhou, 2016) até a América (Cho; Mccarl, 2017), como também na Europa (Ramirez-Cabral *et al.*, 2016). Presentemente, é fundamental um conjunto de mudanças de paradigmas em que o modo de vida da sociedade passe a ser mais sustentável e as práticas industriais e agrícolas, voltem-se à preservação dos ambientes, com intuito de mitigar as sequelas decorrentes das mudanças climáticas (Gama, 2023).

Nesse sentido, a Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 apresentou ao mundo um documento com 17 Objetivos para um Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses ODS passaram por uma negociação participativa mundial para sua elaboração, com abertura das discussões em 2013. O Brasil participou efetivamente das discussões e definições a respeito dos fundamentos e diretrizes da presente agenda. São 169 metas, os ODS buscam uma agenda mundial a fim de construir e implementar políticas públicas voltadas para direcionar a postura da humanidade frente as possíveis catástrofes climáticas decorrentes da ação humana (ONU, 2015).

Nessa agenda global, são consideradas ações que visam a erradicação da pobreza, a segurança alimentar, agricultura sustentável, saúde, educação, igualdade de gênero, redução das desigualdades, energia, água e saneamento básico, padrões sustentáveis de produção e de

consumo, mudanças do clima, cidades sustentáveis, proteção e uso sustentável dos oceanos e dos ecossistemas terrestres, crescimento econômico inclusivo, infraestrutura, industrialização, entre outros. As dimensões propostas por Sachs (1993) e, atualmente, levantadas pelos ODS sugeridos pela ONU, podem contribuir para um novo cenário, tanto no que se refere ao desenvolvimento sustentável, como ainda uma agricultura que seja ambientalmente correta (ONU, 2015).

Portanto, falar de sustentabilidade não depende apenas de práticas agrícolas com um manejo correto, igualmente da preservação dos recursos hídricos, das florestas, e uma mudança no comportamento das pessoas. O desmatamento ligado à expansão agrícola, especificamente a pecuária extensiva, ainda é um obstáculo a ser ultrapassado para que o desenvolvimento sustentável e mitigação do clima, sobretudo onde essas atividades são intensivas, a exemplo da América do Sul (Gil *et al.*, 2018).

Há uma ligação intrínseca entre a agricultura e as mudanças climáticas, o que torna difícil falar da primeira sem trazer à tona as causas da segunda. Os efeitos do aquecimento global no abastecimento de comida são alarmantes, visto que associadamente à redução na produção de alimentos, o crescimento da população mundial está vinculado a dependência por mais e mais comida (Six; Paustian, 2016).

O desmatamento é considerado fonte primária de emissão de gases do efeito estufa quando se trata de mudanças no uso da terra. Entre 2019 e 2021, esse aumento foi significativo no avanço de áreas desmatadas (Souza, 2021). Aproximadamente, 95% das emissões de gases tem relação com o desmatamento, das 62 milhões de toneladas de CO₂ - equivalente emitidas no Brasil, dois terços (62%) são derivadas de mudanças do uso da terra entre os anos de 1990 a 2016 (Seeg, 2018). Isso acontece porque, para ocorrer a expansão da agricultura, é necessária uma grande quantidade de áreas para a produção (Baveye *et al.*, 2020).

Ademais, maior parte dos insumos agrícolas emitem carbono, como é o caso das enormes quantidades de fertilizantes químicos (extração e formulação de NPK). O Brasil possui um setor agrícola elevadamente produtivo, e permanece como pioneiro na intensificação da agricultura para ampliar a produtividade agrícola. Além de, atender às sucessivas demandas alimentícias regionais, nacionais, e globais e, paralelamente, soma alguns esforços para não expandir a área agrícola por desmatamento (Assad *et al.*, 2013).

Até o início da segunda década do século XXI, o Brasil comandou várias iniciativas nacionais e internacionais para frear as emissões provenientes do desmatamento e da mudança do uso do solo. Promoveu energia renovável, especialmente bioenergia e uso de combustíveis

renováveis, além de aderir uma Política Nacional de Mudança Climática, que inclui uma meta voluntária nacional de redução de Gases do Efeito Estufa (GEE) para 2020 (Assad *et al.* 2013).

Portanto, tem ocorrido uma preocupação crescente, em nível mundial, sobre o aumento da variabilidade climática de curto, médio e longo prazo, pois esta terá impactos negativos sobre a agricultura (Lehmann *et al.*, 2020). No que se refere a agricultura brasileira, os impactos poderão afetar a balança comercial do país, visto que, o setor do agronegócio é o que mais impacta na economia nacional.

1.3 Matéria Orgânica do Solo

Os resíduos vegetais são os principais materiais que são decompostos nos solos e, por isso, são as principais fontes de matéria orgânica. Os tecidos vegetais verdes contêm 60 a 90% de água em seu peso. Se os tecidos da planta são secos para remover toda a água, a matéria seca remanescente consiste em sua maior parte (pelo menos 90 a 95%) de carbono, oxigênio e hidrogênio. Os compostos orgânicos dos tecidos vegetais podem ser agrupados em algumas grandes categorias (açúcares, aminas e proteínas simples, proteínas brutas, hemicelulose, celulose, gorduras e ceras, lignina e compostos fenólicos). As ligninas e os polifenóis são notadamente mais resistentes à ação decompositora dos microrganismos do solo (Brady; Weil, 2001).

A decomposição provoca a quebra de grandes moléculas orgânicas em compostos menores e mais simples. As moléculas de lignina são extensas e complexas, com centenas de subunidades fenólicas interligadas em forma de anéis, as quais poucos microrganismos conseguem quebrar. A decomposição dos tecidos orgânicos é uma importante fonte de nitrogênio, enxofre e fósforo e outros elementos essenciais para as plantas. A mineralização também pode ser considerada fator imprescindível. É caracterizada como processo que libera elementos a partir de compostos orgânicos para produzir formas inorgânicas (ou minerais), a qual é a última etapa da decomposição (Lepsch, 2016).

Organismos r-estrategistas (assim chamados por sua rápida taxa de crescimento e reprodução) e k-estrategistas (produtores de enzimas resistentes à decomposição) estão associados ao processo de decomposição. À medida que esses organismos se multiplicam, a biomassa microbiana aumenta e também sintetiza novos compostos orgânicos fora de suas células (Brady; Weil, 2001).

A biomassa microbiana, pode ser responsável por 1/6 de toda matéria orgânica presente no solo (Cotrufo; Lavalley, 2021). Essa atividade intensa pode estimular a quebra de compostos

mais resistente, fenômeno ativador conhecido como efeito priming. Com toda essa frenética atividade microbiana, os compostos facilmente decomponíveis são exauridos. Enquanto os k-estrategistas continuam seu lento trabalho de degradação da celulose e lignina, os r-estrategistas começam a sucumbir (Ricklefs, 2018).

Os fatores preponderantes para os processos de mineralização e decomposição estão associados com as condições ambientais do solo e a qualidade dos resíduos adicionados como fonte de alimento para os organismos do solo. A umidade do solo, boa aeração e temperaturas quentes proporcionam ambiente ideal para rápida decomposição e mineralização (Moura, 2021).

A MOS é composta por (1) biomassa viva (tecidos intactos de plantas, animais e microrganismos); (2) raízes mortas e outras moléculas, tanto de vegetais como de serrapilheira, que são reconhecíveis e; (3) mistura de substâncias orgânicas complexas já não identificáveis como tecidos (grande parte amorfa e coloidal). Somente a última categoria de material orgânico é nomeada de húmus do solo. O elemento carbono desempenha papel essencial na estrutura química de todas as substâncias orgânicas, assim a nomenclatura Carbono Orgânico do Solo (COS) é comumente usada na literatura para se referir a esse elemento constituinte da MOS (Ricklefs, 2018).

A MOS é composta principalmente de carbono, hidrogênio e oxigênio e possui pequenas quantidades de outros elementos, como nitrogênio, fósforo, enxofre, potássio, cálcio e magnésio contidos em resíduos orgânicos. Cerca de 58% da massa de matéria orgânica existe como carbono. Estima-se a porcentagem de MOS a partir da determinação do COS, com o fator de conversão 1,72 (derivado de $100/58$). Então, $MOS (\%) = COS \text{ total } (\%) \times 1,72$. Esse fator de conversão pode variar em diferentes solos, mas 1,72 fornece uma estimativa razoável de MOS para a maioria dos propósitos (Moura *et al.*, 2020).

A matéria orgânica, mesmo em quantidades pequenas, afeta diretamente os atributos e os processos do solo. A adição de MOS resulta em uma complexa cadeia de múltiplos benefícios (Moura *et al.*, 2020). Como exemplo, ao adicionar-se cobertura morta (*mulch*) à superfície do solo, a atividade de minhocas é favorecida, o que leva à formação de bioporos que, conseqüentemente, aumentará a infiltração da água e diminuirá sua perda por escoamento (Ricklefs, 2018).

Como efeito físico a ação da MOS, o húmus tende a proporcionar aos horizontes superficiais, cores que variam entre marrom-escuro e preto. Os agregados granulares e estáveis são formados por influência de substâncias não húmicas produzidas por bactérias e fungos. As

frações húmicas ajudam a reduzir a plasticidade, coesão e aderência dos solos argilosos, o que os torna mais fáceis de serem manejados. A retenção hídrica do solo também é melhorada, pois a matéria orgânica aumenta não apenas com a infiltração de água, mas também a sua capacidade de retenção (Cardoso; Andreote, 2016).

Os efeitos químicos relacionados a matéria orgânica dizem respeito a sua capacidade de absorção de cátions no horizonte mais superficial de solos minerais, que varia entre 50 a 90%. Assim como os coloides da argila, o húmus retém os cátions que são nutrientes na forma facilmente trocável, os quais podem ser usados pelas plantas de maneira que não sejam facilmente lixiviados para fora do perfil pela percolação da água (Rodrigues *et al.*, 2013).

Por intermédio de sua Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e dos agrupamentos funcionais ácido-base, a matéria orgânica também contribui, em grande parte, para o poder tampão do pH no solo. Ademais, o nitrogênio, fósforo, enxofre e os micronutrientes são armazenados como constituintes da matéria orgânica do solo, da qual podem ser lentamente liberados pela sua mineralização (Santos *et al.*, 2014).

Para a avaliação da qualidade da matéria orgânica do solo é necessária uma análise das diferentes frações ou dos compartimentos de carbono orgânico que variam de acordo com a sua vulnerabilidade ao metabolismo microbiano (Ricklefs, 2018). O comportamento ativo da matéria orgânica consiste nas frações lábeis (facilmente decomponíveis) com uma meia-vida de somente poucos dias ou anos (Lennon; Jones, 2011).

A matéria orgânica no compartimento ativo inclui frações, como matéria orgânica viva da biomassa, pequenos fragmentos de detritos, denominados matéria orgânica particulada (MOP) (Lavallee *et al.*, 2020) e, muitos polissacarídeos e outras substâncias não húmicas (Angst *et al.*, 2017). Esse compartimento fornece a maior parte dos nutrientes de fácil acesso para os organismos do solo e grande parte do nitrogênio prontamente mineralizável (Cotrufo *et al.*, 2019). O compartimento ativo pode ser aumentado pela adição de resíduos de origem animal e vegetal, no entanto, é também facilmente perdido quando tais adições são reduzidas ou se o preparo do solo para plantios é intensificado (Andreote *et al.*, 2012).

Já o compartimento passivo da matéria orgânica do solo consiste em materiais muito estáveis e pode permanecer no solo centenas ou milhares de anos. Esse compartimento inclui a maioria dos materiais fisicamente protegidos por complexos do tipo argila-húmus, com cerca de 60 a 90% da matéria orgânica de muitos solos (Santos *et al.* 2014). O compartimento passivo está fortemente associado às propriedades coloidais do húmus e é responsável por grande parte da capacidade de retenção de cátions e de água no solo pela matéria orgânica (Kannan *et al.*,

2021).

O compartimento lento da matéria orgânica do solo possui propriedades intermediárias entre o ativo e o passivo e, possivelmente, inclui frações de proteínas orgânicas de mesmo tamanho, as quais são ricas em lignina e outros componentes lentamente decomponíveis e quimicamente resistentes (Adair *et al.*, 2008). A meia-vida desses materiais é normalmente medida em décadas. O compartimento lento é uma importante fonte de nitrogênio e outros nutrientes passíveis de serem mineralizados para as plantas e fornece grande parte da fonte de alimento-base para o metabolismo dos microrganismos k-estrategistas do solo (Ricklefs, 2018).

A MOS é determinada pelo balanço de ganhos e perdas do carbono orgânico. Vários fatores influenciam diretamente nos níveis de MOS, como exemplo, sob baixas temperaturas a taxa de crescimento das plantas ultrapassa a taxa de decomposição, e a matéria orgânica se acumula. O oposto também é verdadeiro. O carbono orgânico e o nitrogênio do solo aumentam à medida que a umidade também aumenta. Os menores níveis de matéria orgânica e a maior dificuldade em manter esses níveis estão presentes onde a temperatura média anual é alta e a precipitação pluvial é baixa (Pimentel *et al.*, 1997).

O acúmulo de MOS, a longo prazo, é algo extremamente necessário não só pelas suas funções, mas para o sequestro de C, aumento da retenção de água, absorção de cátions trocáveis, inibição de pesticidas e a desintoxicação por metais pesados. Assim, a inclusão de plantas leguminosas e o uso de adubos minerais nitrogenados são duas práticas que permitem o aumento da produtividade, concomitantemente a medidas para minimizar as perdas de nitrogênio por lixiviação, erosão ou volatilização (Ricklefs, 2018).

1.4 Cátions Polivalentes

1.4.1 Silício

O silício (Si) apresenta-se como o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre (27,6%) (Wedepohl, 1995; Barbosa Filho, 2000), não é considerado um elemento essencial às plantas (Jones, Handreck; 1967), porém têm-se mostrado como elemento atuante em uma série de efeitos benéficos, como no auxílio ao crescimento e produção das plantas. O silício possui propriedades elétricas e físicas, característicos de um semimetal, com papel importante no reino mineral (Barbosa Filho, 2000).

De acordo com os princípios agronômicos, as principais formas de Si presentes no solo são: os minerais silicatados (cristalinos e amorfos); o Si solúvel (H_4SiO_4), e o Si adsorvido ou

precipitado com óxidos de ferro e alumínio. Pode-se encontrar o Si nos minerais silicatados, exemplos como feldspatos, plagioclásios, orthoclásio e quartzo, que é a principal forma de Si no solo, pela alta estabilidade. Aproximadamente 80 % das rochas ígneas, derivadas de outras rochas e das rochas metamórficas, são constituídas de silicatos, nas rochas sedimentares o conteúdo é menor (Jackson, 1965), a sílica associa-se com o oxigênio e outros elementos (Al, Mg, Ca, Na, Fe e K), 95% das rochas terrestres, meteoritos, em todas as águas, atmosfera (pó silicoso), vegetais e animais (Barbosa Filho, 2000).

Em solos tropicais e subtropicais, expostos à intemperização com os cultivos sucessivos, há uma tendência dos baixos níveis de Si trocável, cerca de 5 a 10 vezes menores das que são encontrados nos solos das regiões temperadas (Mc Keague; Cline, 1963; Foy, 1992). Esses solos, normalmente, apresentam baixo pH, alto teor de Al, baixa saturação por bases, além de uma atividade microbiana reduzida (Moura, 2021).

Associados a esses fatores, os efeitos dos silicatos nos solos estão ligados ao aumento do pH, fornecimento de Ca e Mg, efeito residual, aumento da disponibilidade de fósforo às plantas e redução dos efeitos tóxicos de Al, Mn e Fe (Korndörfer *et al.*, 2004). A utilização de silicatos como fertilizantes favorece o aproveitamento de fósforo em solos ácidos (Pulz *et al.*, 2008).

Em ecossistemas específicos, a diminuição de silício pode levar a problemas. Nos solos utilizados intensivamente, ocorre déficits desse elemento, já que a exportação de silício não é repostada, o que nesse caso requereria uma adubação silicatada para reequilibrar essa equação (Lima Filho *et al.*, 1999). Associada a essa condição, na maioria dos solos, principalmente solos tropicais, sujeitos a intemperização e lixiviação, expostos a cultivos sucessivos, há baixos níveis de silício trocável, esses solos, em sua maioria, apresentam baixo pH, altos teores de alumínio, baixa saturação de bases, alta capacidade de fósforo e baixa atividade microbiana (Cornelis; Delvaux, 2016).

1.4.2 Cálcio

O cálcio é fundamental para todas as plantas, quando está presente nos solos possui grande interferência na composição das espécies e sobre a capacidade produtiva de sistemas agrícolas e florestais. Ao ser ingerido pelos animais através das plantas, auxilia no crescimento de ossos, dentes e participa de vários processos fisiológicos. A presença desse nutriente nos solos em determinadas partes do globo eventualmente permitiu a ascensão de espécies animais específicas devido à alta correlação entre o status do nutriente no solo e a presença nos tecidos

e órgãos dos seres vivos presentes na região (Brady, 2010).

O Ca-trocável é o indicador da disponibilidade de cálcio nos solos. Apesar de solos ácidos serem considerados pobres em Ca^{2+} , a calagem tem atuado como suporte aos produtores para a correção da deficiência do nutriente e correção do pH dos solos brasileiros, caracterizados em sua maioria por um alto grau de intemperização (Malavolta, 2006).

Apontado como o quinto elemento em maior abundância na crosta terrestre, é encontrado apenas em rochas ou minerais carbonatados como o calcário, dolomita, mármore, e em sulfatados como o gesso e o alabastro. O cálcio é encontrado em grandes quantidades em solos calcários de regiões áridas. Solos argilosos possuem mais cálcio que os arenosos e, solos orgânicos, recentemente drenados, normalmente contêm baixas concentrações de cálcio, fato esse também evidenciado em solos ácidos das regiões tropicais (Moura *et al.*, 2018).

Na agricultura, as fontes do macronutriente secundário, principalmente, são o calcário e o gesso. O superfosfato simples e o superfosfato triplo são comuns fornecedores de cálcio, em conjunto com outros nutrientes, contêm cerca de 18-20% e 12% de cálcio, respectivamente. Outros exemplos são o termofosfato, nitrato de cálcio, cinzas e escória da siderurgia, (Malavolta, 2006).

O ciclo do cálcio no solo está de acordo com adições e perdas do nutriente ao meio. A deposição de particulados e de materiais calcários, derivados ou não da ação do homem, reforçam a parte mineralógica do solo, que sofre intemperismo por agentes físicos, químicos e biológicos, assim como a água, a temperatura, as enzimas do solo e a microfauna, que disponibiliza o cálcio à solução do solo. Contraposto a isso, a precipitação do nutriente no solo causa, em uma escala maior de tempo, o retorno à fase mineral, o que resulta em um equilíbrio entre estas partes (Brady, 2010).

1. 5 Biomassa vegetal

A principal fonte de carbono do solo é a biomassa vegetal. Os processos de decomposição da biomassa e da estabilização da MOS foram por muito tempo separados pelos estudiosos do uso de biomassa para aumentar a MOS (Sollins *et al.*, 2007). A pesquisa de decomposição da biomassa se concentrou nos efeitos da qualidade da biomassa na mineralização a curto prazo e na liberação de nutrientes (Parton *et al.*, 2007), ao mesmo tempo que a pesquisa de estabilização da MOS teve foco em interações e processos que aumentam a estabilidade da MOS total, devido à proteção físico-química contra a atuação dos organismos

decompositores (Lützow *et al.*, 2008).

No presente já há o consenso de que para compreender as respostas da MOS, é necessário avaliar também as mudanças ambientais globais, a decomposição da biomassa e a estabilização da MOS integralmente (Dungait *et al.*, 2012). Desse modo, a decomposição da biomassa é caracterizada como um processo pelo qual parte da energia e dos nutrientes são transferidos da biomassa do solo para vários grupos de organismos decompositores (Whalen; Sampedro, 2009).

A fauna de maior tamanho (mesofauna e macrofauna) acelera as taxas de decomposição com seu trabalho em conjunto com a fauna de menor tamanho (microfauna) e com os microrganismos ali existentes (Simpson *et al.*, 2012). A fauna detritívora maior contribui para a decomposição através da trituração da biomassa em pedaços menores, o que abre novas superfícies para o ataque microbiano. Associada a presença e atuação dos decompositores, a qualidade/composição química da biomassa é fator de controle da decomposição.

Os indicadores que determinam a taxa de decomposição, tem sido associado a fatores químicos da biomassa, como: os conteúdos de carbono (C), nitrogênio (N), a relação C / N, os teores de lignina e de polifenóis. Os processos de degradação do solo causados pela utilização de métodos convencionais, sistemas conservacionistas de manejo do solo, como o plantio direto, podem ser adotados e resultam em melhoria relevante da qualidade do solo (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Esses benefícios são promovidos por diversos fatores, que vão desde a proteção física dos compostos orgânicos que diminui a velocidade da decomposição microbiana, favorecida pela oclusão do C em agregados do solo, até a proteção química dos compostos, por meio da interação destes com os minerais e cátions do solo (Siqueira-Neto *et al.*, 2010).

Associado a esses fatores, o não revolvimento do solo também pode atuar como fator que proporciona a diminuição da fragmentação dos resíduos vegetais, com conseqüente redução do contato entre solo e resíduo, o que promove menor decomposição do resíduo pela biota do solo (Souza *et al.*, 2016). O uso do plantio direto com a alternância de gramíneas e culturas comerciais tem um grande potencial para melhorar a qualidade do solo através do sequestro de carbono, ciclagem de água e nutrientes e melhoria dos atributos microbiológicos do solo (Coser *et al.*, 2016; Lima *et al.*, 2020).

Segundo Carvalho *et al.*, (2010), a manutenção de resíduos vegetais na superfície, a rotação de culturas e o mínimo revolvimento do solo, são os princípios básicos da implantação do SPD, além disso, há a redução da emissão de CO₂ para a atmosfera e aumento do estoque

de carbono e nitrogênio no solo. O funcionamento da comunidade microbiana do solo é importante para a compreensão dos processos em nível de ecossistema (Cotrufo et al., 2019).

Dessa forma, considera-se que a condição desejável quando se busca sistemas mais conservacionistas, é aquela em que o solo tenha sempre cobertura vegetal, pois, contribui com sua proteção e aumento no aporte de matéria orgânica. Além disso, o uso de plantas condicionadoras em sistema plantio direto promove aumento nos fluxos de carbono, nitrogênio e de energia no sistema solo-planta-atmosfera (Silva *et al.*, 2006).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAIR, E. C. *et al.* **Agropecuário e solos agrícolas**. Parcerias Estratégicas, Brasília, v. 27, p. 73–111, 2008.
- AGUIAR, A. C. F. *et al.* Nutrient recycling and physical indicators of an alley cropping system in a sandy loam soil in the Pre-Amazon region of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 86, p. 189-198, 2010.
- AMELUNG, W. *et al.* Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. **Nature Communications**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 1-10, 27 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. Doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>.
- ALBERT, S. *et al.* Heading for the hills: climate-driven community relocations in the Solomon Islands and Alaska provide insight for a 1.5 C future. **Regional environmental change**, v. 18, p. 2261-2272, 2018.
- ANDREOTE, F. D. *et al.* The Microbiome of Brazilian Mangrove Sediments as Revealed by Metagenomics. *Plos One*, [S.L.], v. 7, n. 6, p. 1-14, 21 jun. 2012. **Public Library of Science (PLoS)**. Doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0038600>.
- BARBOSA FILHO, M. P. Importância do silício para a cultura do arroz. Informações Agrônomicas, (**Encarte técnico**), Piracicaba. n. 89, p. 1-8, 2000.
- BAVEYE, P. C. *et al.* Soil Organic Matter Research and Climate Change: merely re-storing carbon versus restoring soil functions. **Frontiers In Environmental Science**, [S.L.], v. 8, p. 1-8, 10 set. 2020. Frontiers Media SA. Doi: <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904>.
- BEZERRA C. E. E. *et al.* Genesis of cohesive soil horizons from north-east Brazil: role of argilluviation and sorting of sand. **Soil Research**, v. 53, p. 43–55, 2015.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production. **Geoderma**, v. 141, p. 355-362. 2007.
- BRADY N. C. **Elementos da Natureza e Propriedades do Solo**. Livraria Bookman. 2010. 685p.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. **The nature and properties of soils**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008.
- BREVIK, E. The Potential Impact of Climate Change on Soil Properties and Processes and Corresponding Influence on Food Security. **Agriculture**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 398-417, 31 jul. 2013. MDPI AG. Doi: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture3030398>.
- BURKE, I. C.; HART, S. C. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates. **Glob. Chang. Biol.** v14, p. 2636–2660, 2008.
- CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 171-179, 1999.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. 2a edição, Piracicaba: Editora ESALQ. 221p., 2016.

CARVALHO, J. L. N. *et al.* Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.34, p.277- 289, 2010.

CORNELIS, J. T.; DELVAUX, B. Soil processes drive the biological silicon feedback loop. **Functional Ecology**, [S.L.], v. 30, n. 8, p. 1298-1310, ago. 2016. Wiley. Doi: <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.12704>.

CHANEY, K.; SWIFT, R.S. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. **Journal of Soil Science**. v. 35, p. 223-230, 1984.

CHEN, R. *et al.* Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories. **Global change biology**, v. 20(7), p. 2356-2367, 2014.

COSER, T. R. C. *et al.* Soil microbiological properties and available nitrogen for corn in monoculture and intercropped with forage, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1660-1667. 2016.

COTRUFO, M. F. *et al.* In-N-Out: A hierarchical framework to understand and predict soil carbon storage and nitrogen recycling. **Global Change Biology**, v. 27, n. 19, 2021.

COTRUFO, M. F. *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nat. Geosci.** v. 12, p. 989–994, 2019.

DUNGAIT, J. A. J. *et al.* Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**. v. 18, p. 1781–1796, 2012.

FAO. The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges; **FAO**: Rome, Italy, 2017; ISBN: 9789251095515.

GAMA, J. T. The Role of Soils in Sustainability, Climate Change, and Ecosystem Services: challenges and opportunities. **Ecologies**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 552-567, 16 ago. 2023. MDPI AG. Doi: <http://dx.doi.org/10.3390/ecologies4030036>.

GODFRAY, H. C. J. *et al.* Food security: the challenge of feeding 9 Billion people. **Science**, v. 327, p. 812-818, 2010.

HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P. Emerging consensus on desirable characteristics of tools to support farmers' management of climate risk in Australia. **Agricultural Systems**, v. 104, p. 441-450, 2011.

HOCHMAN, Z. *et al.* Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. **European Journal of Agronomy**, v. 44, p. 109-123. 2011.

IPCC. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel**

on climate change. [FIELD, C. B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L. (Ed.)] Cambridge: Cambridge University Press, 594 p, 2012.

IPCC. Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: **IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, V. Masson-Delmotte *et al.*, Eds. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2018).

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press, 2022.

IPCC. **Climate Change 2023: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp, 2023. Doi:10.1017/9781009157896.

JACKSON, M. L. Chemical composition of soils. In F. E. Bear (ed.) *Chemistry of the soil.* Van Nostrand Reinhold Company, New York, p. 71-141, 1964.

JONES, J. H.; HANDRECK, K. A. Effect of iron and aluminum oxides on silica in solution in soils. *Nature*, London, v. 108 p. 852-853, 1963.

KANNAN, P. *et al.* Effects of crop residue mulch and seedbed preparation methods on soil properties and rainfed groundnut production in Alfisols of semi-arid India. **Soil Use and Management.** v. 37 (3), p. 479–493, 2021.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. (**Boletim técnico**, 2), Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU. 34p., 2004.

KOPITTKE, P. M., *et al.* Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environment International**, [S.L.], v. 132, p. 105078, nov. 2019. Elsevier BV. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.

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.** Kingdom. v. 15, p. 339-397, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103878>.

LAVALLEE, J.M., SOONG, J.L., COTRUFO, M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Glob. Chang. Biol.** v. 26, p. 261–273, 2020.

LENNON, J., JONES, S. Microbial seed banks: the ecological and evolutionary implications of dormancy. **Nat Rev Microbiol.** v. 9, p. 119–130, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2504>.

LEHMANN, J. *et al.* The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, [S.L.], v. 1, n. 10, p. 544-553, 25 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. Doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>.

LEPSCH, I. F. **19 lições de Pedologia**. Editora Oficina de Texto. 1ª edição. 456p., 2011.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. Oficina de Textos. São Paulo. 177p., 2001.

LIMA FILHO, O. F. *et al.* **Silício na agricultura**. Informações Agronômicas, n. 87, p. 1-7, 1999.

LIMA, M. A.; ALVES, B. J. R. **Vulnerabilidades, impactos e adaptação à mudança do clima no setor agropecuário e solos agrícolas**. Brasília, DF, n.27, p.73-110, 2008.

LIMA, C. A., *et al.* Uso de coberturas alternativas do solo para o controle das perdas de solo em regiões semiáridas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 531-542, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020193900>.

MASON, E., *et al.* Gundula. Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature. **Frontiers In Soil Science**, [S.L.], v. 3, p. 1-14, 18 dez. 2023. Frontiers Media SA. Doi: <http://dx.doi.org/10.3389/fsoil.2023.1268037>.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 251p., 2006.

MCKEAGUE, J.A.; CLINE., M.G. Silica in Soils. **Advances In Agronomy**, [S.L.], p. 339-396, 1963. Elsevier. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60403-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60403-4).

MOURA, E. G *et al.* Effectiveness of calcined rock phosphate and leucena prunings as a source of nutrients for maize in tropical soil. **biological agriculture & horticulture**. 2013. Doi:<https://doi.org/10.1080/01448765.2013.781486>.

MOURA, E. G. **Entre a Agricultura e a Ecologia, uma interface por onde transita a emancipação dos agricultores do trópico úmido**. [S. l.: s. n.], 2021.

MOURA, E.G.; ALBUQUERQUE, J.M.; AGUIAR, A.C.F. Growth and productivity of corn as affected by mulching and tillage in alley cropping systems. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 204-8. 2008.

MOURA, E.G., *et al.* Management of a cohesive tropical soil to enhance rootability and increase the efficiency of nitrogen and potassium use. **Soil Use and Management**, v. 28, p. 3-375, 2012.68

MOURA, E.G., *et al.* Enhancement of the rootability of a structurally fragile tropical soil using gypsum and leguminous residues to increase the maize yield. **Soil Use and Management**, v. 32. 2016.

MOUSSADEK, R., *et al.* Tillage System Affects Soil Organic Carbon Storage and Quality in Central Morocco. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2014.

NASCIMENTO, W. M. O. do. *et al.* Qualidade sanitária e germinação de sementes de *Pterogyne nitens* Tull. (Leguminosae- Caesalpinioideae). **Revista Brasileira de Sementes**, v.28, n.1, p.149-153, 2006.

OLIVEIRA, D. de. **O solo sob nossos pés**. São Paulo: Atual, 2010.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia Aplicada**. 4. ed. São Paulo: FEALQ, 2011. 592 p.

ONU, 2015. Organização das Nações Unidas. **Conheça os novos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/>. Acesso em: 03 nov. 2022.

PARTON W. SILVER, W. L., BURKE, I. C. *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. **Science**, v. 315, p. 361–364, 2007.

PASCUAL, U., *et al.* On the value of soil biodiversity and ecosystem services. **Ecosystem Services**, [S.L.], v. 15, p. 11-18, out. 2015. Elsevier BV. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.06.002>.

PÉREZ, D. V.; BREFIN, M. L. M.; POLIDORO, J. C. Solo, da origem da vida ao alicerce das civilizações: uso, manejo e gestão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 51, n. 9, p. 1-6, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x201600090000i>.

PIMENTEL, D. *et al.* Economic and environmental benefits of biodiversity. **BioScience**, Washington, v. 47, p. 747-757, 1997.

PULZ, A. L., CRUSCIOL, C. A. C., LEMOS, L. B., & SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira De Ciência do Solo**, 32(4), 1651–1659, 2008. <https://doi.org/10.1590/S010006832008000400030>.

QUESADA, C. A., CLAUDIA, P., ERICK, O., MENDOZA, O., LAWRENCE, P., GUSTAVO, S., JON L.,-**Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon Forest soil carbon concentrations** *Soil*, 6, 53–88, 2020. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>.

RAHMANI, W., *et al.* Effect of Different Types of Mulching on Soil Properties and Tree Growth of *Magnolia champaca* Planted at the Montane Rainforest in Cameron Highlands, Pahang, Malaysia. **International Journal Of Forestry Research**, [S.L.], v. 2021, p. 1-11, 7 set. 2021. Hindawi Limited. Doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2021/5517238>.

- RAMOS; F, T., *et al.* Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 2018.
- RICKLEFS, R. E. **Economia da Natureza**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.
- RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO-FILHO, H. de F. (Eds.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: EDUSP, 2000. p. 235-248.
- SANTOS, E.C. *et al.* Artificial neural network modeling of microbial community structures in the Atlantic Forest of Brazil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 69, p. 101-109, 2014.
- SANTOS, G. A. *et al.* (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654p.
- SILVA, E.C; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P.C.O. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura, em Latossolo vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.477-486, 2006.
- SILVA, R.R. *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1585-1592, 2010.
- SIMPSON, J. E., SLADE, E., RIUTTA T., TAYLOR, M. E. Factors Affecting Soil Fauna Feeding Activity in a Fragmented Lowland Temperate Deciduous Woodland. **PLoS ONE**, v. 7, n. 1, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029616>.
- SIQUEIRA-NETO, M. *et al.* Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. **Soil and Tillage Research**, v.110, p.187-195, 2010.
- SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. **Journal Of Biosystems Engineering**, [S.L.], v. 46, n. 4, p. 417-439, 24 nov. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>.
- SOLLINS, P., SWANSTON C., KRAMER, M. Stabilization and destabilization of soil organic matter—a new focus. **Biogeochemistry**, v. 85, p. 1–7, 2007.
- SOUZA, E.D. *et al.* Matéria orgânica e agregação do solo após conversão de “campos de murundus” em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1194-1202, 2016.
- SOUZA, L. Desmatamento em terras indígenas provocou emissão de CO2 na Amazônia. **Agência Brasil**, 4 maio 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-05/desmatamento-em-terras-indigenas-provocou-emissao-de-co2-na-amazonia>. Acesso em: 8 ago. 2023.

SUN, J. *et al.* Maize canopy photosynthetic efficiency, plant growth, and yield responses to tillage depth. **Agronomy**, v. 9, n. 1, p. 3, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010003>.

TARKIEWICZ, S., NOSALEWICZ, A. Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loess. **International agrophysics**, v. 19, n. 4, p. 345, 2005.

TORRES, F. C. **Conservação e uso do solo**. Indaial: UNIASSELVI, 2011. 206 p.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

VON LÜTZOW, M., *et al.* Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, p. 111–124, 2008.

WEDEPOHL, K. H. A composição da crosta continental. **Geochimica et cosmochimica Acta**, v. 59, n. 7, p. 1217-1232, 1995.

WEI, S., *et al.* Plant density and nitrogen supply affect the grain-filling parameters of maize kernels located in different ear positions. **Frontiers in Plant Science** **01**. 2019. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00180>.

WHALEN, J. K., SAMPEDRO, L. **Soil Ecology and Management Edit.** CABI, 2009.

WONG, M.T.F.; ASSENG, S. Yield and environmental benefits of ameliorating subsoil constraints under variable rainfall in a Mediterranean environment. **Plant Soil**, v. 297, p. 29-42. 2007.

ZHOU, M. *et al.* Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. **Nature/Scientific Reports**, v. 10, p. 1–13, 2020.

CAPÍTULO II

INDICADORES QUE DETERMINAM O AUMENTO DA FRAÇÃO ESTÁVEL DA MATÉRIA ORGÂNICA E A MANUTENÇÃO DE CÁTIOS BÁSICOS

1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais e sociais relacionados às mudanças climáticas afetarão a maioria dos interesses vitais das sociedades (IPCC, 2019). Entre os impactos relacionados às mudanças climáticas, destaca-se o aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos (ECE), em relação aos índices elevados de calor e precipitação, com ocorrência de inundações, alagamentos, deslizamentos, movimentos de massa e seca para algumas regiões (Marengo *et al.*, 2009).

Para o sudeste da América do Sul, onde se localiza o Brasil, são projetados aumentos na frequência e intensidade de precipitações extremas, além dos aumentos de precipitação média e extrema já observados desde 1960 (IPCC, 2021). O setor agrícola é diretamente impactado pelas mudanças climáticas e extremamente vulnerável (Marengo *et al.*, 2009; Tol, 2018; Nogueira; Santos; Cunha, 2020) e, neste setor, os agricultores familiares, em função do menor acesso aos recursos financeiros e de dependerem diretamente da produção agrícola para sua subsistência, em geral, apresentam maior vulnerabilidade e menor condição de adaptação diante da variabilidade climática atual e projetada em função do aquecimento global (Lindoso; Eiró; Rocha, 2013; Milanés, 2021).

Nesse contexto, o acúmulo de matéria orgânica do solo tem efeitos benéficos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, que por sua vez reduzem a erosão do solo e mitigam as mudanças climáticas (Lal, 2005). O armazenamento de carbono do solo dos agroecossistemas são conceituados como o equilíbrio de longo prazo entre insumos de materiais orgânicos, principalmente como resíduos vegetais, e perdas respiratórias de C do solo (Torn *et al.*, 2005; Shao *et al.* 2019).

O carbono orgânico do solo (COS) é um indicador essencial da saúde do solo. A saúde do solo refere-se à “capacidade do solo de funcionar efetivamente como um componente de um ecossistema saudável” (Schoenholtz *et al.* 2000, p. 335). A quantidade e a qualidade do COS estão ligadas a funções importantes do solo, que incluem a mineralização de nutrientes, estabilidade dos agregados, permeabilidade ao ar, retenção de água, infiltração e controle de enchentes. Por sua vez, essas funções do solo estão correlacionadas com uma ampla gama de propriedades do ecossistema. Por exemplo, o alto estoque de COS em solos minerais geralmente está associado à alta produtividade da planta (Oldfield *et al.*, 2017), com implicações positivas subsequentes para o habitat, distribuição e abundância da vida selvagem.

Um dos mecanismos que pode contribuir para a estabilização da MOS, está associado às interações dos compostos derivados da decomposição da biomassa com as superfícies minerais de cátions polivalentes (Ca, Mg, Fe, Si) (Lützow *et al.*, 2008). De fato, esses cátions polivalentes interagem com grupos funcionais de MOS formando pontes de cátions, o que leva à relativa estabilização de MOS (Moore; Turunen, 2004). As ligações entre cátions polivalentes e grupos funcionais de matéria orgânica carregados negativamente não são facilmente reversíveis, e as superfícies de materiais orgânicos são menos acessíveis para atividade microbiana (Whittinghill; Hobbie, 2012).

Dessa forma, os índices de saúde do solo incorporam medidas de COS e podem ser usados para rastrear mudanças na saúde do solo ao longo do tempo em resposta às atividades de manejo; assim, medir e monitorar os níveis de COS pode levar a uma percepção geral do ecossistema e da saúde do solo em um determinado local (Lal, 2020). Ademais, serviços ecossistêmicos como a cobertura morta, a ciclagem de nutrientes, o aumento e a estabilização da matéria orgânica do solo e o sequestro de carbono, serão considerados estratégicos para mudar radicalmente a aptidão das terras do trópico úmido que, com sua reduzida fertilidade natural, não podem suportar sistemas agrícolas sustentáveis (Moura, 2021).

Portanto, espera-se que as interações dos compostos derivados da decomposição da biomassa com as superfícies minerais de cátions polivalentes (Ca e Si), seja eficaz e viável do ponto de vista prático, para possibilitar a estabilização da matéria orgânica do solo, aumento da capacidade do solo em reter cátions, e assim proporcionar a capacidade de enraizamento do solo, com intuito de evitar os efeitos adversos da concentração de cátions ácidos na zona radicular. A agricultura pode contribuir decisivamente para a inversão do fluxo de carbono do sistema solo-atmosfera, retirado do ar pelo processo de fotossíntese das leguminosas, incorporados ao solo via biomassa. Hipotetizamos que a aplicação de Ca e Si associada a adição de leguminosas e aplicação de ureia aumenta a estabilidade da matéria orgânica e melhora a nutrição nitrogenada e produtividade de milho em solo coeso na periferia amazônica maranhense. Logo, avaliamos os efeitos da adição de biomassa de leguminosas com e sem a aplicação de Ca, Si e ou ureia, sobre o teor de carbono orgânico no solo, e no teor de N na planta e produtividade de milho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área

O experimento foi conduzido no período de outubro de 2021 a março de 2023 na Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil (latitude 2°35'37.26" sul, longitude 44°12'39.61" oeste). O clima da região é definido como Aw, caracterizado como tropical subúmido seco, conforme a classificação de Köppen (Kottek, *et al.*, 2006), com dois períodos definidos, um chuvoso (inverno), entre os meses de janeiro a junho, e outro seco (verão) de julho a dezembro. A temperatura média anual foi de aproximadamente 27 °C. A precipitação pluviométrica acumulada em 2021 foi de 2.195, mm e, em 2022, 2.566 mm (INMET, 2023).

O solo é classificado como Argissolo Acinzentado distrófico arênico (Santos *et al.*, 2018). É descrito como solo coeso, derivados de rochas sedimentares clásticas, com baixos teores de elementos agregadores, como ferro, cálcio e carbono orgânico (Giarola *et al.*, 2011). A Tabela 1 apresenta as propriedades químicas e físicas do solo da área experimental.

Tabela 1: Propriedades químicas e físicas do solo utilizado no experimento na profundidade de 0-10 cm.

pH (CaCl ₂)	P	Al + H	Ca	Mg	K	CTC	ST	C-org	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
4,0	15	25	15	9	1	50	50	20	300	545	65	90

ST: saturação de base percentual, CTC: capacidade troca de cátions. C-org: carbono orgânico. Fonte: Gomes, 2023.

A área experimental encontrava-se em pousio desde 1990 e continha uma espécie nativa de grama, que foi removida com aplicação de glifosato. As ervas daninhas foram removidas manualmente. 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.

2.2 Descrição do experimento

O delineamento experimental foi estabelecido em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições e oito tratamentos: Ureia (U); Leguminosas (L); Leguminosas + Ureia (LU); Cálcio + Leguminosas (CL); Silício + Leguminosas (SL); Cálcio + Leguminosas + Ureia (CLU); Silício + Leguminosas + Ureia (SLU); Cálcio + Silício + Leguminosas + Ureia (CSLU).

As parcelas mediam 32 m², com 1.024 m² de área total.

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 estilosantes foi cultivada na área experimental e leucena e gliricídia foram coletadas em áreas adjacentes. No total foram aplicados 7.700 kg/ha/ano de biomassa de leguminosas. Após o corte e aplicação da biomassa, foi plantado milho (*Zea mays* L. cultivar AG 1051) com espaçamento de 85 cm entre linhas e 25 cm entre plantas. Foram aplicados 260 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 24,5 kg ha⁻¹ de KCl no plantio do milho. O nitrogênio (ureia) foi aplicado nas doses de 110 e 200 kg/ha⁻¹/ano no plantio e cinquenta dias após o plantio do milho, respectivamente.

2.2.1 Análise de Carbono

As amostras de solo foram coletadas com trado holandês do tipo sonda com diâmetro de 100 mm, em pontos previamente determinados. Três subamostras por parcela foram coletadas na profundidade de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm, para formarem amostras compostas e homogeneizadas, com total de 64 amostras para representação da área experimental.

O carbono orgânico particulado (COP) e carbono associado aos minerais (COAM) foram determinados a partir da adaptação do método de Cambardella e Elliott (1993). Assim, foram pesados 10 gramas de solo seco ao ar e peneirados em malha de 2 mm, colocados em copos de polietileno de 250 ml e com adição de 40 ml de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹). Após as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, com 130 oscilações.min⁻¹, passadas por peneira de malha de 0,053 mm e enxaguadas repetidamente com água destilada para remoção total da argila. O material particulado recluso na peneira foi realocado para copos de polietileno com jatos de água. Em seguida, o material foi seco em estufa de circulação de ar forçado a 50°C até alcançar massa constante.

Posteriormente a secagem, o material foi pesado e determinou-se à massa da fração particulada (PF). A seguir, foi moído e homogeneizado para ser submetido à determinação do COT (Sparks, 1996), através da oxidação do carbono via dicromato de potássio, para obter o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP). O COP foi calculado conforme a equação:

$$\text{COP} = \frac{\text{CFP} \times \text{MFP}}{\text{Ps}}$$

Onde, COP = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g kg⁻¹; CFP = teor de carbono da fração particulada, em g kg⁻¹; MFP = massa da fração particulada, em gramas; Ps = massa da amostra inicial do solo, em gramas (10 gramas).

O COAM foi calculado pela diferença entre carbono orgânico total e carbono orgânico particulado com a seguinte equação:

$$\text{COAM} = \text{COT} - \text{COP}$$

O estoque de carbono no solo foi calculado de acordo com a equação abaixo (Veldkamp, 1994):

$$\text{ECS} = (\text{COT} \times \text{Ds} \times \text{e}) / 10$$

Onde, ECS = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹); COT = carbono orgânico total na profundidade amostrada (g Kg⁻¹); Ds = densidade do solo na camada amostrada (Kg dm⁻³); e = espessura da camada amostrada (cm).

2.2.3 Nitrogênio foliar

Para análise do nitrogênio foram coletadas 10 plantas de milho, área equivalente a 2 m² de cada parcela, selecionadas aleatoriamente na floração e na maturação fisiológica. Todos esses materiais vegetais passaram por secagem por 60° C até obter um peso constante, as subamostras foram retiradas e trituradas. As concentrações totais de N foram determinadas após a digestão com H₂SO₄ – H₂O₂, de acordo com o método padrão descrito por Cottenie (1980).

2.2.4 Análise dos cátions polivalentes

Os cátions polivalentes cálcio e silício foram determinados com a solução de cloreto de potássio (KCl) para extração do cálcio por titulação (Teixeira *et al.*, 2017), e cloreto de cálcio (CaCl₂) para extração do silício disponível pelo método colorimétrico (Korndörfer *et al.*, 2004). Os teores de cálcio nas soluções extratoras foram determinados por titulação com EDTA 0,0125 mol L⁻¹. Para silício fez-se a leitura em Espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm.

2.2.5 Componentes de Produtividade

Para os parâmetros de rendimento e produtividade do milho, 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).

2.3 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e, em seguida, foi aplicado o teste de Tukey ($P < 0,05$) para comparação das médias das variáveis influenciadas significativamente pelos tratamentos. Foi realizada ainda análise de componentes principais (PCA) para verificar as correlações existentes entre as variáveis dependentes. A ANOVA e o teste de Tukey foram feitos com o pacote ExpDes.pt, e a PCA com o pacote factoextra. Todas as análises foram feitas no software R version 4.2.3 (R core Team, 2023).

3 RESULTADOS

3.1 Efeitos da aplicação combinada de Ca, Si, ureia e biomassa de leguminosas sobre o carbono orgânico e os teores de Ca e Si no solo

Os tratamentos influenciaram significativamente o carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e o carbono orgânico total (COT), tanto na profundidade de 0-10 cm ($P<0,001$; CV: COP= 16,0%, COAM=13,2%, COT=7,9%), quanto na profundidade de 10-20 cm ($P=0,001$; CV: COP= 20,7%, COAM=8,8%, COT=5,5%). Os tratamentos também influenciaram significativamente o estoque de carbono ($P<0,001$; CV=4,6%).

A aplicação de Ca e Si com biomassa de leguminosas e a aplicação de ureia aumentou todas as frações de carbono orgânico e o estoque de carbono no solo. As médias dos teores de COP, COAM e COT nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm foram, respectivamente, 5,2 e 2,3, 11 e 8,5, e 16,3 e 10,8 g kg⁻¹ (Figura 1). A média do estoque de carbono foi 83,4 Mg ha⁻¹. Os tratamentos que proporcionaram maior estocagem de carbono no solo foram as combinações de Ca+L+U, Si+L e Ca+Si+L+U. Em média, o estoque de carbono no solo obtido com a aplicação desses tratamentos foi de 102,2 Mg ha⁻¹. Esse estoque de carbono foi 60,9% maior que o obtido quando foi aplicado somente ureia (Figura 2).

Na profundidade de 0-10 cm os teores de COP e COT (Figura 1) foram significativamente maiores nos tratamentos S+L, Ca+L+U e Ca+Si+L+U. Dentre esses, o tratamento Ca+Si+L+U proporcionou teor de COAM significativamente maior do que os tratamentos que não receberam a aplicação de Si e ou Ca (Figura 1). A média de COAM nesse tratamento da aplicação combinada de Ca e Si, biomassa de leguminosas e ureia foi 22 g kg⁻¹, que superou em aproximadamente 80% a média do COAM nos tratamentos em que foram usados somente ureia e ou biomassa de leguminosas (Figura 1).

Na profundidade de 10-20, os maiores teores de COAM e COT foram determinados nos tratamentos Ca+Si+L+U e Si+L, porém, houve um efeito mais pronunciado do tratamento Ca+Si+L+U sobre essas variáveis (Figura 1). As médias de COAM (11,1 g kg⁻¹) e COT (13,7 g kg⁻¹) nesse tratamento (Ca+Si+L+U) foram, respectivamente, 60% e 75% maiores do que a médias dessas variáveis no tratamento em que foi usado somente ureia (Figura 1). Entretanto, esse tratamento exerceu baixa influência sobre o COP. A maior média dessa variável foi 4,2 g kg⁻¹, obtida no tratamento somente com leguminosas (Figura 1).

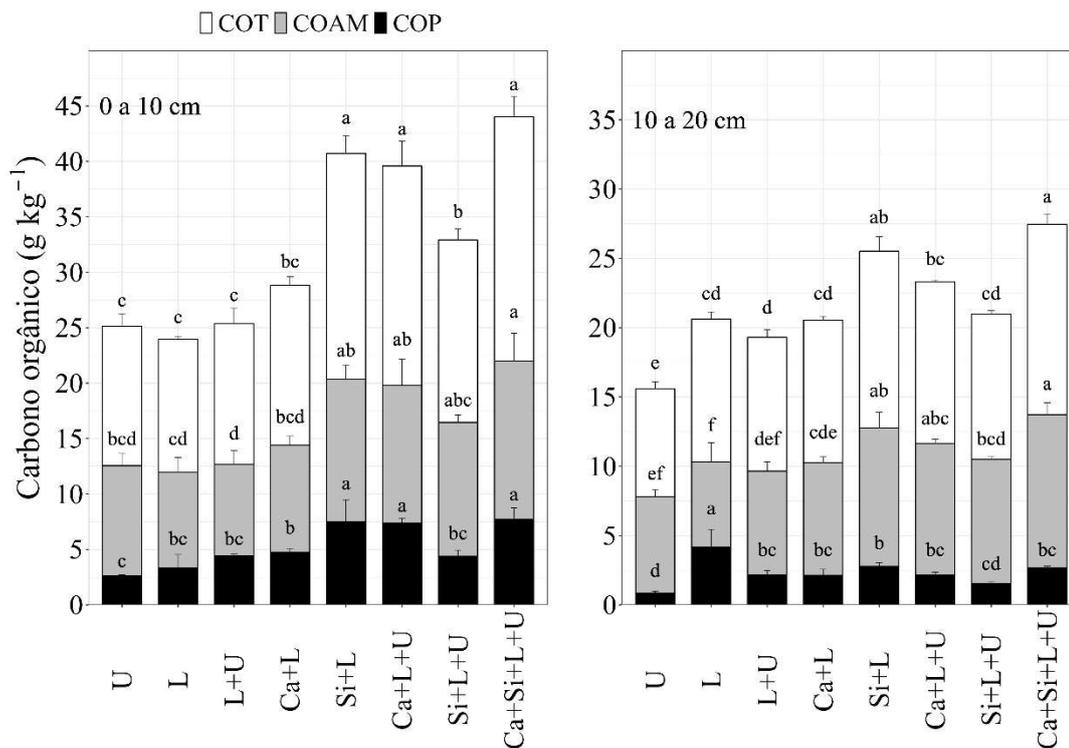


Figura 1: Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no teor de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico total (COT) em solo coeso. São Luís, MA, 2023. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro representam o desvio padrão.

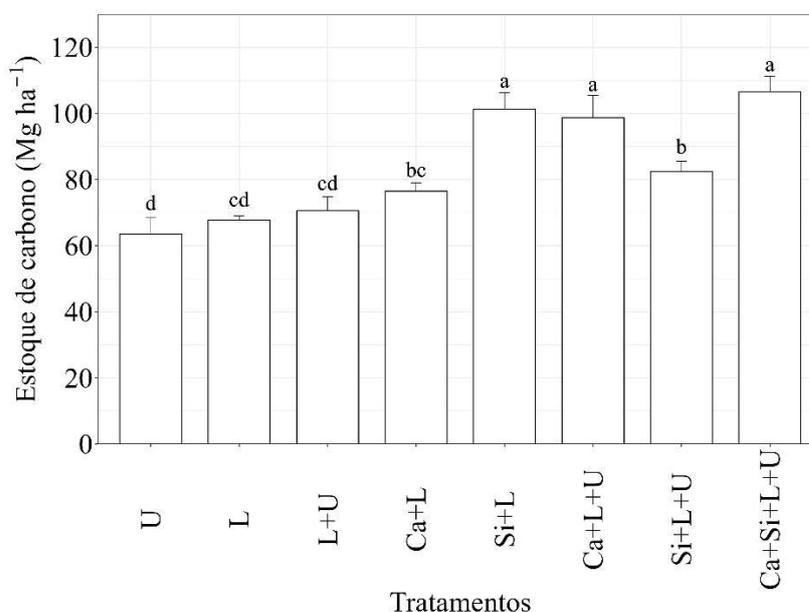


Figura 2: Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no estoque de carbono em solo coeso. São Luís, MA, 2023. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro representam o desvio padrão.

Os tratamentos influenciaram significativamente os teores de cálcio (Ca) na profundidade de 0-20 cm ($P<0,001$; CV: 0-10 cm=17,4%, 10-20 cm=14,3%) e o teor de silício (Si) na profundidade de 0-10 cm ($P<0,001$; CV=7,2%), mas não tiveram efeito significativo sobre o teor de silício na profundidade de 10-20 cm ($P<0,373$; CV=13,7%; média±desvio padrão=2,14±0,34 mg/dm³).

As médias dos teores de Ca foram 24,5 mmol/dm³, na profundidade de 0-10 cm e 11 mmol/dm³, na profundidade de 10-20 cm. Na profundidade de 0-10 cm os tratamentos Ca+L e Ca+Si+L+U proporcionaram as maiores médias de teor de Ca. Na profundidade de 10-20 cm o maior teor de Ca foi obtido no tratamento Ca+Si+L+U. Nos tratamentos somente com ureia e biomassa de leguminosas e Si+L+U, foram determinados teores de Ca mais baixos do que com os tratamentos em que foram aplicados Ca. Em média, o teor de Ca determinado no tratamento Ca+Si+L+U foi até 3 vezes maior do que o teor determinado nos tratamentos somente com ureia e leguminas (Figura 3).

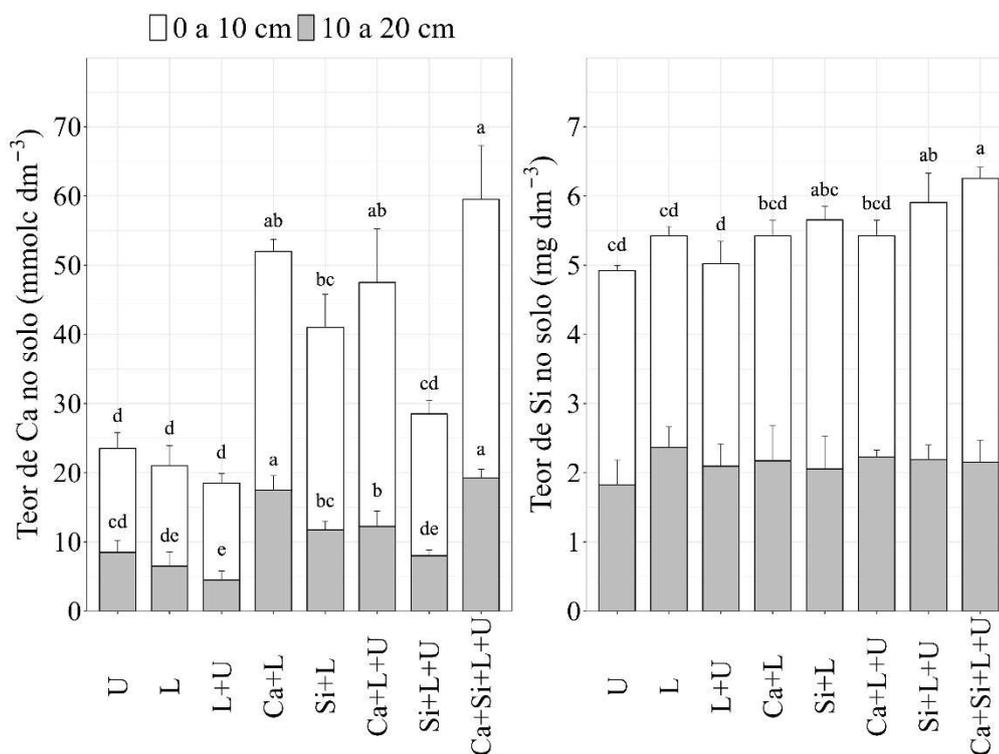


Figura 3: Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no teor de Ca e Si em solo coeso. São Luís, MA, 2023. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro representam o desvio padrão.

O teor de Si na profundidade de 0-10 cm variou de 2,9 a 4,1 mg/dm³, com média de 3,4 mg/dm³. O maior teor de Si no solo foi obtido no tratamento Ca+Si+L+U (4,1 mg/dm³). O teor de Si alcançado com a aplicação desse tratamento foi de 33% maior do que a média obtida nos tratamentos sem aplicação dos cátions. Não houve diferença significativa entre as médias dos teores de Si dos tratamentos U, L, L+U, Ca+L, e Ca+L+U (Figura 3).

3.2 Efeitos da aplicação combinada de Ca, Si ureia e biomassa de leguminosas sobre os agregados do solo

Os tratamentos influenciaram significativamente a formação de macroagregados ($P<0,0177$; CV=8,4%) e microagregados ($P<0,0177$; CV=6,1%), e o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) ($P<0,001$; CV=12,2%). Em relação a formação de agregados, houve diferença significativa somente entre as médias de macro e microagregados do tratamento Ca+Si+L+U em relação ao tratamento L, com maior porcentagem de microagregados e menor porcentagem de macroagregados no tratamento Ca+Si+L+U (Tabela 2). De maneira semelhante, a média do DMP nos tratamentos somente com leguminosas e L+U foram significativamente maiores do que a média do DMP no tratamento Ca+Si+L+U. As médias do DMP dos tratamentos em que foram aplicados Ca e Si e somente ureia, não diferiram significativamente entre si.

Tabela 2: Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, na formação de agregados do solo. São Luís, MA, 2023.

Tratamentos	Microagregados	Macroagregados	DMP
	%	%	mm
U	59,3 ab	40,7 ab	1,20 bc
L	51,9 b	48,1 a	1,68 a
L+U	56 ab	44 ab	1,51 ab
Ca+L	59,8 ab	40,2 ab	1,28 bc
Si+L	58,7 ab	41,3 ab	1,29 bc
Ca+L+U	57,4 ab	42,6 ab	1,32 abc
Si+L+U	58,4 ab	41,6 ab	1,29 bc
Ca+Si+L+U	62,8 a	37,2 b	1,03 c
CV%	6,1	8,4	12,2

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) e; Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

3.3 Efeitos da aplicação combinada de Ca, Si, ureia e biomassa de leguminosas sobre acúmulo de N nas plantas e na produtividade de milho e componentes.

Os tratamentos influenciaram significativamente o acúmulo de N na planta nas fases de floração e maturação ($P<0,001$), a remobilização de N ($P<0,007$) e o número de grãos por metro ($P<0,010$). Porém, não influenciaram a produtividade de grãos ($P=0,303$; média±desvio=6,4±2,3 Mg/ha) e a massa de 100 grãos ($P<0,1939$; média±desvio padrão=27,34±2,8 g) (Tabela 3).

As plantas cultivadas nas condições de Si+L+U e Ca+Si+L+U acumularam mais N do que as plantas cultivadas com os tratamentos Ca+L, L+U, L e U na fase de floração, e apresentaram acúmulo de N mais altos, que os demais tratamentos na fase de maturação. As plantas que foram cultivadas na condição dos tratamentos somente leguminosas, somente ureia, L+U e Ca+L apresentaram os teores de N mais baixos (Tabela 3).

Em média, as plantas cultivadas com a aplicação de Si+L+U e Ca+Si+L+U acumularam 3,7 vezes mais N na floração e 6,8 vezes mais N na maturação, do que as plantas cultivadas com aplicação de biomassa de leguminosas ou ureia, isoladamente. Quanto a remobilização de N, as plantas que receberam os tratamentos Ca+Si+L+U, Si+L+U e Si+L remobilizaram mais N que as plantas que receberam o tratamento Ca+L (Tabela 3).

Tabela 3: Efeito da adição de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e ureia, no acúmulo de N no caule e nas folhas, no número de grãos/metro e na produtividade de milho. São Luís, MA, 2023.

Tratamentos	Acúmulo de	Acúmulo de	Remobilização	Grãos/metro	Produtividade
	N-Floração	N-Maturação			
	------(kg/ha)-----			-	Mg/ha
U	22,2 d	7,9 d	14,3 ab	1341 ab	4,76
L	20,3 d	8,0 d	12,2 ab	1237 b	5,65
L+U	38,3 bcd	18,4 cd	19,9 ab	1628 ab	6,25
Ca+L	25,3 cd	18,1 cd	7,2 b	1250 b	5,73
Si+L	51,8 abc	27,6 bc	24,2 a	1483 ab	6,41
Ca+L+U	57,8 ab	35,6 b	22,2 ab	1623 ab	6,52
Si+L+U	80,3 a	56,6 a	23,7 a	2015 ab	8,01
Ca+Si+L+U	80,3 a	53,6 a	26,7 a	2190 a	8,15
CV%	25,8	22,4	36,9	22,9	31,7

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. 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) e; Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Na avaliação do carbono orgânico e dos teores de Ca e Si na profundidade de 0-10 cm, a análise de componentes principais (PCA) mostrou que os componentes 1 (Dim1) e 2 (Dim2) explicaram 88,3% da variação total entre as variáveis, o que indica alta confiabilidade dos dados. Nessa PCA, as variáveis que tiveram maior peso no componente 1 foram COAM, COT, estoque de carbono e teor de Si. E as variáveis que tiveram maior peso no componente 2 foram a porcentagem de macroagregados, microagregados e diâmetro médio ponderado dos agregados (Figura 4).

Na avaliação do carbono orgânico e dos teores de Ca e Si na profundidade de 10-20 cm, a análise de componentes principais (PCA) mostrou que os componentes 1 (Dim1) e 2 (Dim2) explicaram 86,5% a variação total entre as variáveis. Nessa PCA, as variáveis que tiveram maior peso no componente 1 foram COAM, porcentagem de microagregados e macroagregados, e diâmetro médio ponderado dos agregados. E as variáveis que tiveram maior peso no componente 2 foram COP, teor de Si e COT (Figura 4)

Os teores de Ca correlacionaram significativamente e positivamente com os teores de COP, COAM, COT e com o estoque de carbono na profundidade de 0-10, e com a porcentagem de microagregados na profundidade de 10-20 cm, mas não correlacionou significativamente com a produtividade. Os teores de Si correlacionaram significativamente e positivamente com os teores de COAM e COT e com o estoque de carbono e produtividade na profundidade de 0-10 cm, e com o teor de COP na profundidade de 10-20 cm (Figura 4, Tabela 4).

Com exceção do teor de COP na profundidade de 10-20 cm, houve correlações positivas entre a produtividade de grãos e as frações de carbono orgânico e o estoque de carbono (Figura 4). Entretanto, somente a correlação com o COAM foi significativa (Tabela 4).

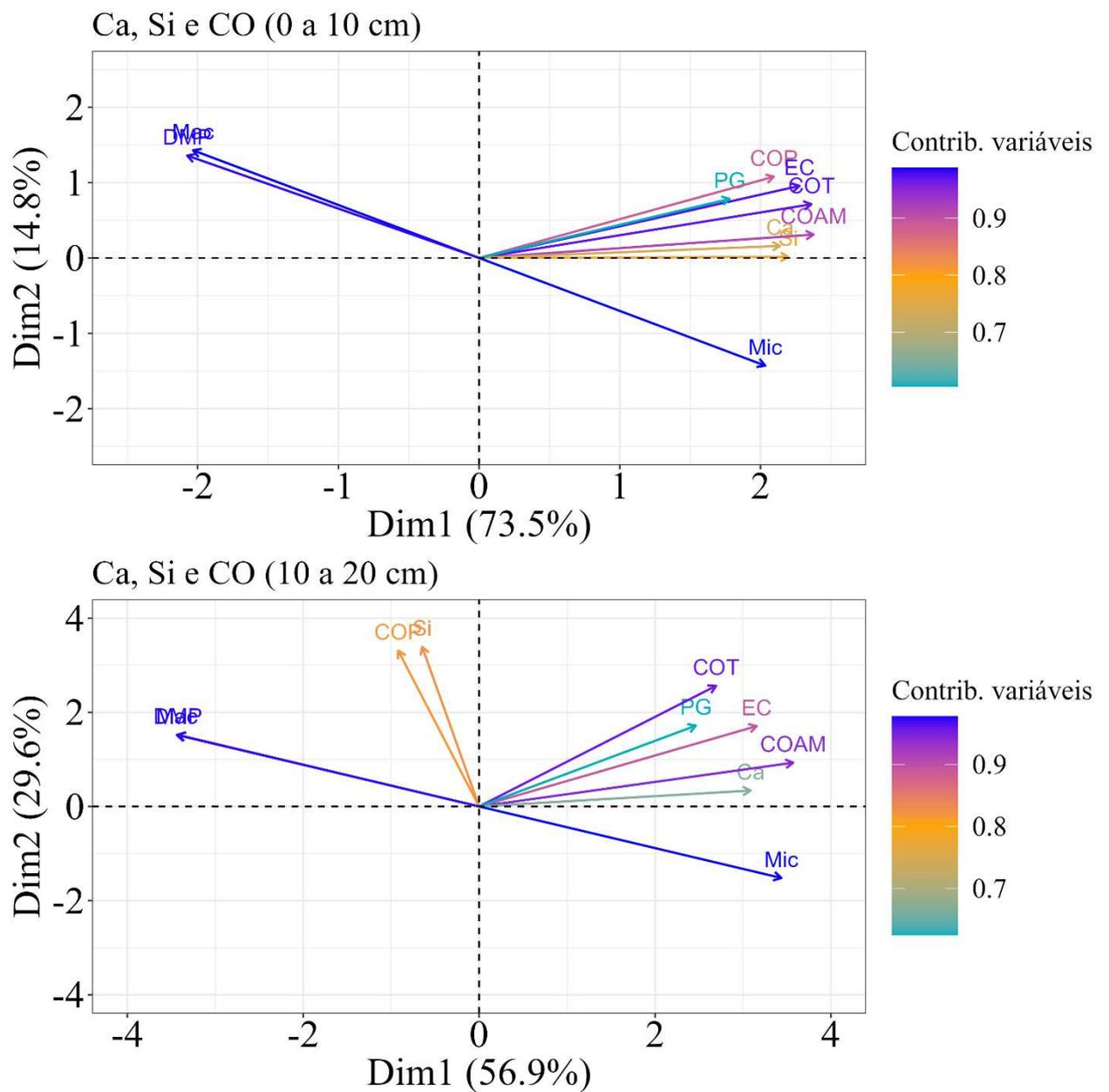


Figura 4: Análise de componentes principais com as variáveis teor de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico total (COT), Ca e Si nas profundidades de 0-10 e 10 a 20 cm, e porcentagem de macroagregados (Mac) e microagregados (Mic), diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e produtividade de grãos de milho (PG), avaliados em solo coeso após aplicação de biomassa de leguminosas com e sem Ca, Si e ureia. São Luís, MA, 2023.

Tabela 4: Valores de P da análise de correlação de Pearson entre as variáveis.

CO, Ca e Si na profundidade de 0 a 10 cm										
Variáveis	COP	COAM	COT	EC	Ca	Si	PG	Mac	Mic	DMP
COP	0,000									
COAM	0,016	0,000								
COT	0,000	0,000	0,000							
EC	0,000	0,002	0,000	0,000						
Ca	0,012	0,035	0,012	0,011	0,000					
Si	0,113	0,004	0,021	0,034	0,100	0,000				
PG	0,130	0,051	0,063	0,063	0,246	0,014	0,000			
Mac	0,253	0,066	0,114	0,180	0,070	0,061	0,324	0,000		
Mic	0,253	0,066	0,114	0,180	0,070	0,061	0,324	0,000	0,000	
DMP	0,255	0,032	0,086	0,156	0,080	0,047	0,325	0,000	0,000	0,000

CO, Ca e Si na profundidade de 10 a 20 cm										
Variáveis	COP	COAM	COT	EC	Ca	Si	PG	Mac	Mic	DMP
COP	0,000									
COAM	0,869	0,000								
COT	0,250	0,007	0,000							
EC	0,706	0,000	0,001	0,000						
Ca	0,972	0,065	0,108	0,092	0,000					
Si	0,033	0,986	0,329	0,673	0,908	0,000				
PG	0,869	0,033	0,052	0,063	0,428	0,389	0,000			
Mac	0,172	0,043	0,379	0,180	0,031	0,222	0,324	0,000		
Mic	0,172	0,043	0,379	0,180	0,031	0,222	0,324	0,000	0,000	
DMP	0,162	0,042	0,382	0,156	0,042	0,213	0,325	0,000	0,000	0,000

Teor de Ca e de Si, carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico total (COT), porcentagem de micro (Mic) e macroagregados (Mac), diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e produtividade do milho (PG), avaliadas em solo coeso após aplicação de biomassa de leguminosas com e sem aplicação de Ca, Si e/ou ureia. São Luís, MA, 2023.

4 DISCUSSÃO

Neste estudo avaliamos o efeito da aplicação de biomassa de leguminosas com e sem a aplicação Ca e Si e ureia, sobre as frações de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associada aos minerais (COAM), e no carbono orgânico total (COT) e no estoque de carbono em solo coeso na periferia amazônica maranhense. Avaliamos ainda o efeito desses tratamentos sobre o acúmulo de N na planta e na produtividade de milho. Mostramos que a adição de biomassa de leguminosas quando combinada com a aplicação de Ca, Si e ureia aumentou significativamente a fração do carbono associada aos minerais e o acúmulo de N na planta, em relação ao uso da biomassa de leguminosas ou aplicação de ureia isoladamente. Entretanto, não aumentou significativamente produtividade. Mostramos ainda, que a aplicação de Si com leguminosas ou Ca com leguminosas e ureia, geralmente elevaram os teores de COP, COAM, COT e o estoque de carbono. No entanto, efeitos mais significativos foram obtidos com a aplicação desses dois cátions juntos.

Esses resultados sugerem que houve ação simultânea do Ca e do Si na proteção do carbono do solo. Além disso, indicam que a elevação dos teores desses cátions no solo é eficaz em elevar os níveis de carbono pela deposição da biomassa vegetal, principalmente os teores de COAM. A correlação positiva dos teores de Ca na profundidade de 0-20 cm e de Si na profundidade de 0-10 cm com os teores de COAM (Figura 4), reforçam essa hipótese. Logo, a aplicação combinada de Ca e Si pode proporcionar maior efeito na estabilidade da matéria orgânica, pois o COAM possui maior grau de estabilização (Moura, 2021), e a maior recalcitrância desta fração, dificulta a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos do solo (Jilling *et al.*, 2018).

Esse aumento no aporte de carbono orgânico do solo, possivelmente está relacionado com a ação do Ca e do Si na proteção da matéria orgânica. Esses cátions auxiliam na proteção física e química do carbono e isso diminui perdas de carbono para a atmosfera (Collins *et al.*, 2001). A concentração de Ca trocável está correlacionada com uma redução nas perdas de matéria orgânica do solo (MOS) por respiração com a diminuição da emissão de CO₂ (Minick *et al.* 2017; Whittinghill; Hobbie, 2012). Os cátions polivalentes mantêm interações com grupos funcionais da MOS. Isso gera pontes de cátions acessíveis para que a matéria orgânica seja estabilizada. Por isso, acredita-se que a associação entre os cátions polivalentes e os grupos funcionais da MOS pode impedir a acessibilidade microbiana (Whittinghill; Hobbie, 2012).

Nunes *et al.* (2020) verificaram que interações entre biomassa de leguminosas, Ca e

ureia aumentou o estoque total de carbono na camada de 0-20 cm, em comparação com o controle (sem leguminas e ureia). Ainda conforme esses autores, as interações entre biomassa de leguminosas, Ca e N podem aumentar as frações de MOS com maior grau de estabilização. Em nosso estudo observamos que interações mais eficientes podem ocorrer com a inclusão do Si associado a esses componentes, conforme foi verificado com o aumento de até 80% no COAM. Esse resultado é relevante do ponto de vista da sustentabilidade dos agroecossistemas, pois a estabilização da MOS em longo prazo se dá pelo aumento dos teores de COAM (Conceição *et al.*, 2013).

A fração estável da MOS é uma determinante crítica do balanço líquido de longo prazo, do carbono e do nitrogênio no ecossistema. Tanto pela perspectiva do sequestro de carbono, quanto da sustentabilidade do uso do solo, essa é uma ferramenta valiosa que pode contribuir decisivamente para diminuir a concentração de CO₂ da atmosfera, mudar a aptidão das terras e emancipar os agricultores do trópico úmido (Lützow *et al.*, 2006).

Em relação aos teores de Ca e Si, mostramos que os tratamentos não influenciaram o teor de Si na profundidade de 10-20 cm, o que não era esperado. Porém, isso pode ser um indicativo de que o Si aplicado se mantém mais concentrado na camada superficial do solo, já que o Si se encontra em diferentes formas e está sujeito a diversos processos físico-químicos que influenciam sua disponibilidade para as plantas. Entre esses processos, destacam-se a adsorção e a absorção, que atuam de maneira interdependente e determinam a dinâmica do Si no solo-planta (Hodson *et al.*, 2017).

A adsorção é o principal mecanismo de retenção do Si no solo, ocorre quando as moléculas de Si se ligam à superfície de minerais argilosos e óxidos de ferro e alumínio. Essa ligação pode ser física, por meio de forças de Van der Waals, ou química, por meio de trocas catiônicas. Já absorção é o processo pelo qual as plantas absorvem o Si do solo. Essa absorção pode ocorrer de forma passiva, por difusão, ou ativa, com o auxílio de proteínas transportadoras (Katz *et al.*, 2021).

A baixa mobilidade do Si é atribuída à sua forte adsorção por minerais do solo e à sua baixa solubilidade em água. A forma química do Si, a textura do solo, o pH do solo e a matéria orgânica do solo são os principais fatores que influenciam a mobilidade do Si (Hodson *et al.*, 2017). Contudo, investigações mais aprofundadas precisam ser realizadas para compreender melhor a dinâmica do Si no solo para explicar esse fenômeno.

O aumento do teor de Ca na profundidade de 0-20 cm e do teor de Si na profundidade de 0-10 cm no tratamento Ca+Si+L+U, quando comparado aos tratamentos que não receberam

Ca e Si, já era esperado. Esse aumento pode estar associado não só a liberação dos nutrientes pelos fertilizantes aplicados, mas também a interações positivas do Ca e do Si com a biomassa vegetal depositada e com o N, de forma que proporcione proteção desses nutrientes contra processos de lixiviação (Glaser *et al.*, 2002).

O cálcio e o silício podem formar pontes entre as partículas de MO, aumentando a coesão e a resistência à decomposição, podem se complexar com minerais argilosos, protegendo a MO da decomposição microbiana, e estimular a atividade de microrganismos benéficos que contribuem para a formação de MO estável. A aplicação de cálcio e silício evidencia uma estratégia eficaz para aumentar a retenção de carbono no solo, melhorar a qualidade do solo e promover a sustentabilidade da agricultura (Silva *et al.*, 2020).

O diâmetro médio ponderado (DMP) e a porcentagem de macroagregados foi menor no tratamento Ca+Si+L+U em relação ao tratamento somente com leguminosas. Logo, a porcentagem de microagregados foi maior nesse tratamento (Ca+Si+L+U), pois essas variáveis são inversamente proporcionais. Isso aumenta a estabilidade dos agregados, pois os microagregados são mais estáveis do que os macroagregados (Cambardella; Elliot, 1992).

Portanto, os microagregados são menos sensíveis ao manejo do solo (Silva; Mielniczuk, 1997; Mielniczuk *et al.*, 2003; Rasse *et al.*, 2005; Tomazi, 2008; Braida *et al.*, 2011; Costa Junior *et al.*, 2012; Brady; Weil, 2013), e podem servir como uma proteção física da matéria orgânica (Sollins *et al.*, 1996; Balesdent *et al.*, 2000; Six *et al.*, 2002; Tomazi, 2008; Braida *et al.*, 2011; Hontoria *et al.*, 2016). A correlação positiva entre a porcentagem de microagregados e os teores de COAM, indica que possivelmente essa fração de carbono do solo (COAM) está mais associada a formação de microagregados do que a de macroagregados.

O menor acúmulo de N nas plantas quando se usou apenas ureia e leguminosas, em relação ao uso combinado de ureia e leguminosas com Ca e Si, sugere que sem a aplicação de Ca e Si, o N fornecido através da biomassa das leguminosas (Moura *et al.*, 2021; Campos *et al.*, 2011) e da aplicação de ureia não é eficientemente aproveitado pelas plantas, nesse solo. Esse aumento nos teores de N na planta possivelmente está associado aos benefícios da maior disponibilidade de Ca e de Si, na estabilidade dos agregados, na melhoria do desempenho das raízes em camadas mais profundas, e, portanto, na melhoria na eficiência do uso da água e de nutrientes (Sumner *et al.*, 1990; Caires *et al.*, 2011).

Logo, a interação cálcio x silício x leguminosas x ureia pode melhorar significativamente a nutrição nitrogenada das plantas. Assim, era esperado que os tratamentos aumentassem também a produtividade, o que não se confirmou. Acreditamos que os efeitos,

ainda não suficientes para refletir em aumento de produtividade, indicam que o manejo com cálcio, silício, leguminosas e ureia a curto prazo não é capaz de promover aumentos significativos no desempenho produtivo das plantas. Portanto, é necessário avaliar em ciclos consecutivos para determinar a influência desse manejo a médio e longo prazo na produção das plantas.

Contudo, ainda que não tenha refletido com o aumento de produtividade a curto prazo, acreditamos que a aplicação de biomassa de leguminosas na superfície do solo associada com Ca, Si e ureia, pode contribuir para a intensificação da agricultura no trópico úmido maranhense e a melhoria da sustentabilidade dos agroecossistemas locais, além de contribuir para sequestrar carbono no solo (Moura *et al.*, 2018; Campos *et al.*, 2011). Além disso, o aumento da matéria orgânica em solos agrícolas pode ajudar a diminuir a incerteza da produtividade anual de cereais, o que é uma questão de grande preocupação para os agricultores do trópico, onde pequena variação na oferta de água pelas chuvas pode causar stress nas culturas, se suas raízes não puderem explorar um maior volume de solo (Moura, 2021).

5 CONCLUSÃO

Nossos resultados sugerem que a aplicação dos cátions polivalentes Ca e Si combinada com a adição de biomassa de leguminosas e ureia, aumenta a estabilização da matéria orgânica do solo e melhora a nutrição nitrogenada. Portanto, essa estratégia pode ser usada como forma de manejo para melhorar a sustentabilidade dos agroecossistemas da periferia da Amazônia maranhense.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBINOT JR *et al.* Contribuição de componentes de rendimento na produtividade de grãos em variedades de polinização aberta de milho. **Revista brasileira de Agrociência**, v. 11, n. 2, p. 161- 166, 2005.

BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 28, p.1261-1263, 1996.

BRADY, N.; WEIL, R. **Elements of the nature and properties of soil**, 2013. 685p.

BRAIDA, J.A. *et al.* **M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo**. In: FILHO, O.K. *et al.* (Org.). Tópicos em Ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.VII, p.222-227, 2011.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

CAIRES, E.F.; JORIS, H.A.W.; CHURKA, S. Long term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, p. 45-53. 2011.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. **Soil Sci. Soc. Am. J**, v. 57, p. 1071-1076, 1993.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777-783, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

CAMPOS, B. H. C. *et al.* Carbon stock and its compartments in a subtropical Oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 805-817, 2011.

COLLINS, Mary E.; KUEHL, R. J. Organic matter accumulation and organic soils. **Wetland soils, genesis, hydrology, landscapes, and classification**. Lewis Pub., Boca Raton, FL, p. 137-162, 2001.

CONCEIÇÃO, P.C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, v.129, p.40-47, 2013. DOI: 10.1016/j.still.2013.01.006.

COSTA JUNIOR, C., *et al.* Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no Bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1311-1321, 2012.

COTTENIE, A. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations. **FAO Soil Bulletin**. Rome, Italy, v.446, p. 1-11, 1980.

FERNÁNDEZ, R., *et al.* Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage. **Soil Tillage Res.**, v. 109, p.103-109, 2010.

GAZOLLA, P. R., *et al.* Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura- pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 693, 2015.

GIAROLA, N. F. B., *et al.* Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: Estudo de caso. **Rev. Bras. Cienc. Solo**. v. 25, p. 239–247, 2011.

GLASER, B., LEHMANN, J., ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - **A review. Biol. Fertil. Soils**, 2002. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>.

HONTORIA, C., *et al.* Aggregate size distribution and associated organic C and N under different tillage systems and Ca-amendment in a degraded Ultisol. **Soil and Tillage Research**, v.160, p.42-52, 2016.

INMET. 2023. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Dados históricos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 15 de abril, 2023.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

JILLING, A., *et al.* A Stuart Grandy Minerals in the rhizosphere: Overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes. **Biogeochemistry**. v. 139, p. 103–122, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0459-5>.

JILLING, A., *et al.* Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes. **Biogeochemistry**. v. 139, p. 103–122, 2018.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34 p. (**Boletim técnico**, 2).

KOTTEK, M, *et al.* **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated**, 2006.

LAL, R. Managing organic matter content for restoring health and ecosystem services of soils of India. **Journal Of The Indian Society Of Soil Science**, [S.L.], v. 68, n. 1, p. 1, 2020. Diva Enterprises Private Limited. Doi: <http://dx.doi.org/10.5958/0974-0228.2020.00001.8>.

LAL, R. Soil carbon sequestration for sustaining agricultural production and improving the environment with particular reference to Brazil. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.26, p.23 42, 2005. Doi: 10.1300/J064v26n04_04.

LINDOSO, D.; EIRÓ, F.; ROCHA, J. D. Desenvolvimento sustentável, adaptação e vulnerabilidade à mudança climática no semiárido nordestino: um estudo de caso no Sertão do São Francisco. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 44, n. especial, p. 301–32, 2013.

MARENGO, J. A., *et al.* **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. 76 p.

MIELNICZUK, J., *et al.* Manejo de solo e culturas e sua relação com estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N. *et al.* (Ed) **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade **Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Minas Gerais, p. 209-248, 2003.

MILANÉS, O. A. G. Agricultura familiar y la adaptación al cambio climático en coaprocor - Paraná, Brasil. Guarujá: **Editora Científica Digital**, p. 379–98. 2021.

MINICK, K. J., FISK, M. C., GROFFMAN, P. M. Soil Ca alters processes contributing to C and N retention in the Oa/A horizon of a northern hardwood forest. **Biogeochemistry** v. 132, p. 343–357, 2017.

MOORE, T. R., TURUNEN, J. Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 2, p. 690-696, 2004. Doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6900>.

MOURA, E. G. **Entre a Agricultura e a Ecologia, uma interface por onde transita a emancipação dos agricultores do trópico úmido**. [S. l.: s. n.], 2021.

MOURA, E. G., *et al.* Gypsum and Legume Residue as a Strategy to Improve Soil Conditions in sustainability of Agrosystems of the Humid Tropics. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1006, 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/su10041006>.

NOGUEIRA, V. G.; SANTOS, E. A.; DA CUNHA, D. A. Vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas: análise de agricultores da bacia hidrográfica do Rio das Contas. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 26–53, 2020.

NUNES J. F., *et al.* Contribution of the mulching in short-and long-term for soil improvement, nitrogen uptake and maize productivity. **Soil Use and Management**, no prelo, 2020.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. **Plant and Soil**, v. 269, p. 341-356, 2005.

RIZZARDI, M. A.; WITECK, D. DEGGERONE, I. Rendimento de grãos e componentes de rendimento de cultivares de milho em duas épocas de semeadura. **Ciência Rural**, v. 24, n. 3, p. 477–482, 1994.

SHAO, P., *et al.* Reforestation accelerates soil organic carbon accumulation: evidence from microbial biomarkers. **Soil Biology & Biochemistry**. v. 131, p. 182–190, 2019.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.113-117, 1997.

SIX, J., *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p.155-176, 2002.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v.74, p.65-105, 1996.

SPARKS, D.L., *et al.* Methods of soil analysis: Chemical methods. Part 3. Madison, **Soil Science Society of America**. p. 961-1010, 1996.

SUMNER, M.E. Gypsum as an Ameliorant for the Subsoil Acidity Syndrome. **Florida Institute of Phosphate Research**, Bartow, FL. 1990.

TEIXEIRA, P. C.; FONTANA, G. K. D. A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª edição. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

TOL, R. S. The economic impacts of climate change. **Review of Environmental Economics and Policy**, Chicago, v. 12, n. 1, p. 4–25, 2018.

TOMAZI, M. **Estabilidade da matéria orgânica em Latossolos do Cerrado sob sistemas de uso manejo**. 2008. 106p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

TORN, M.S., VITOUSEK, P.M., TRUMBORE, S.E. The influence of nutrient availability on soil organic matter turnover estimated by incubations and radiocarbon modeling. **Ecosystems**. v. 8, p. 352–372, 2005.

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**. v. 57, p. 426–445, 2006.

VON LÜTZOW, M., *et al.* Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, p. 111-124, 2008.

WHITTINGHILL, K. A., HOBBI, S. E. 2012. Effects of pH and calcium on soil organic matter dynamics in Alaskan tundra. **Biogeochemistry**, v. 111(1-3), p. 569-581. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9688-6>.