



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BALSAS - CESBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA

KALYNE PEREIRA MIRANDA NASCIMENTO

**INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO DO TRÓPICO ÚMIDO QUE
DETERMINAM A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS**

São Luís - MA
2022

KALYNE PEREIRA MIRANDA NASCIMENTO

**INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO DO TRÓPICO ÚMIDO QUE
DETERMINAM A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente. Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura

São Luís - MA
2022

N244i

Nascimento, Kalyne Pereira Miranda

Indicadores de fertilidade do solo do trópico úmido que determinam a produtividade das culturas. /Kalyne Pereira Miranda Nascimento. – Balsas, 2022.

55 f.

Dissertação (Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente) Universidade Estadual do Maranhão – UEMA / Balsas, 2022.

Orientador: Emanuel Gomes de Moura

1.Indicadores de fertilidade do solo. 2.Produtividade. I. Título.

CDU: 631.13

KALYNE PEREIRA MIRANDA NASCIMENTO

**INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO DO TRÓPICO ÚMIDO QUE
DETERMINAM A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente. Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura

Aprovada em: 21 / 10 / 2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura
Orientador - UEMA



Prof. Dr. Guillaume Xavier Rousseau
Examinador externo - UEMA



Prof. Dr. Jessivaldo Rodrigues Galvão
Examinador externo – UFRA

Á minha querida família, em especial a minha mãe (Rejanilde da Silva Pereira), ao meu esposo (Wedson Nascimento Pereira) e ao meu irmão (Kelcio Pereira Miranda), alicerces da minha vida.

Á minha filha, Helena Nascimento Pereira, por ser meu combustível diário para continuar!

DEDICO

“Consagre ao Senhor tudo o que faz, e seus planos serão bem-sucedidos”.

Provérbios 16:3

AGRADECIMENTOS

Á Deus por permitir que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

Á minha família por ter acreditado nos meus sonhos, por ter me incentivado e apoiado nos momentos difíceis. Á minha mãe, Rejanilde da Silva Pereira, pelo amor, cuidado e incentivo. Ao meu esposo, Wedson Nascimento Pereira, por sempre ter acreditado em mim quando nem eu mesma acreditava, meu maior incentivador e o homem com o coração mais generoso que já conheci. Ao meu irmão, Kelcio Pereira Miranda, por todo apoio demonstrado ao longo do período de execução deste trabalho. Á minha filha, Helena Nascimento Pereira, por ser meu combustível diário para continuar.

Ao meu orientador, professor Doutor Emanuel Gomes de Moura, pelas suas contribuições para o meu crescimento profissional, pelas suas críticas construtivas, discussões e reflexões, foram fundamentais ao longo de todo o percurso.

Aos meus colegas de turma do PPGAA e aos amigos que o mestrado me presenteou, em especial ao meu amigo Pedro Henrique, pela sua disponibilidade, paciência e contribuições de diversas maneiras. Ao Victor Reis por ter me auxiliado com os seus conhecimentos no campo, laboratório e orientações. E a Daiana Santos Gomes pelo incentivo, contribuições no laboratório e pela amizade.

Agradeço às seguintes instituições pelo apoio e disponibilidade de prestações de serviços no decorrer da minha caminhada na Pós-Graduação, Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA). Obrigado a todos!

RESUMO

Nos solos dos trópicos úmidos, especificamente no norte do Maranhão, a matéria orgânica do solo (MOS) e a soma de cátions básicos como cálcio, magnésio e potássio, são uns dos principais indicadores de qualidade do solo utilizados para avaliar sustentabilidade e viabilidade nos agroecossistemas. Visto que, o clima tropical da região favorece a decomposição da (MOS) e a lixiviação dos cátions básicos. Portanto, o objetivo desse trabalho foi identificar os indicadores de fertilidade do solo no trópico úmido no norte do Maranhão que se correlacionam com a produtividade do milho. Para tanto, foram coletadas amostras de solo na comunidade de Santa Rita do Vale, no município de Santa Rita, região norte do estado do Maranhão, Brasil. Foram coletadas amostras em duas áreas com diferentes biomassas aplicadas na superfície do solo, cada área possuía um tamanho de 1.680 m², foram avaliados 24 pontos em cada profundidade, as profundidades avaliadas foram de 0-15 cm e de 15-30 cm do solo. A fim de avaliar os indicadores, Ca, Mg, MOS, COT, COP, COAM, ECOT e composição granulométrica do solo, foram coletadas quatro amostras de solo por ponto, cada repetição com uma distância de dois metros para o ponto central, para formar uma amostra composta. O rendimento do milho foi amostrado em uma área de 4 m² (2m x 2m) ao redor de cada ponto de amostragem. Os resultados indicaram que a produtividade do milho variou de 4,41 Mg ha⁻¹ a 12,51 Mg ha⁻¹. O COAM apresentou correlação positiva significativa com o cálcio, magnésio e cálcio+magnésio. Para manter o grau de sustentabilidade do solo estudado bom, com o teor de argila específico de 115 g kg⁻¹ e o teor de COAM de 11, 50 g kg⁻¹ o limite crítico de cálcio+magnésio determinado foi de 41 mmol_c dm⁻³. Constatou-se correlações positivas significativas da produtividade do milho com os indicadores de fertilidade do solo COAM, Ca, Mg e Ca+Mg nas duas profundidades do solo. Portanto, os indicadores de fertilidade do solo no trópico úmido no norte do Maranhão que se correlacionaram com a produtividade do milho foram o COAM, Ca, Mg e Ca+Mg. Desse modo, bons teores de COAM e cátions polivalentes nos solos da região norte do Maranhão podem permitir a intensificação da produção das culturas.

Palavras-chave: Indicadores de fertilidade do solo. Produtividade.

ABSTRACT

In humid tropics soils, specifically in northern Maranhão, soil organic matter (SOM) and the sum of basic cations such as calcium, magnesium and potassium, are one of the main indicators of soil quality. Soil is used to assess sustainability and viability in agroecosystems. Since the tropical climate of the region favors the decomposition of (SOM) and the leaching of basic cations. Therefore, the objective of this work was to identify soil fertility indicators in the humid tropics of northern Maranhão that correlate with maize productivity. For this purpose, soil samples were collected in the community of Santa Rita do Vale, in the municipality of Santa Rita, in the northern region of the state of Maranhão, Brazil. Samples were collected in two areas with different biomass applied to the soil surface, each area had a size of 1,680 m², 24 points were evaluated at each depth, the evaluated depths were 0-15 cm and 15-30 cm from the soil. In order to evaluate the indicators, Ca, Mg, SOM, COT, COP, COAM, ECOT and soil granulometric composition, four soil samples were collected per point, each repetition with a distance of two meters from the central point, to form a composite sample. Maize yield was sampled in an area of 4 m² (2m x 2m) around each sampling point. The results indicated that maize productivity ranged from 4.41 Mg ha⁻¹ to 12.51 Mg ha⁻¹. The COAM showed a significant positive correlation with calcium, magnesium and calcium+magnesium. In order to maintain a good degree of sustainability in the studied soil, with a specific clay content of 115 g kg⁻¹ and a COAM content of 11.50 g kg⁻¹, the critical limit of calcium+magnesium determined was 41 mmolc dm⁻³. Significant positive correlations were found between maize yield and soil fertility indicators COAM, Ca, Mg and Ca+Mg at both soil depths. Therefore, soil fertility indicators in the humid tropics of northern Maranhão that correlated with maize yield were COAM, Ca, Mg and Ca+Mg. Thus, good levels of COAM and polyvalent cations in the soils of the northern region of Maranhão may allow the intensification of crop production.

Keywords: Soil fertility indicators. Productivity.

LISTA DE SIGLAS

Al – Alumínio;

C – Carbono;

Ca – Cálcio;

C/N – Carbono/Nitrogênio;

COAM – Carbono orgânico associado aos minerais;

COP – Carbono orgânico particulado;

COS – Carbono orgânico do solo;

COT – Carbono orgânico total;

ECOT – Estoque de carbono orgânico total;

Fe – Ferro;

GEE – Gases do efeito estufa;

IEA – Intensificação ecológica da agricultura;

K – Potássio;

Mg – Magnésio;

Mg ha⁻¹ – Mega grama por hectare;

MO – Matéria orgânica;

MOS – Matéria orgânica do solo;

N – Nitrogênio;

P – Fósforo;

S – Enxofre;

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização das áreas de coleta na comunidade Quilombola Santa Rita do Vale, no município de Santa Rita, região norte do estado do Maranhão..... 32
- Figura 2.** Gráficos de regressão do carbono orgânico associado aos minerais (COAM) com cálcio (Ca) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B)..... 39
- Figura 3.** Gráfico de regressão do carbono orgânico associado aos minerais (COAM) com magnésio (Mg) na profundidade de 0-15 cm do solo..... 39
- Figura 4.** Gráficos de regressão de carbono orgânico associado aos minerais (COAM) com cálcio+magnésio (Ca+Mg) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B). 40
- Figura 5.** Gráfico do limite crítico de cálcio+magnésio para o teor de COAM de 11,50 g kg⁻¹ 41
- Figura 6.** Gráficos de regressão da produtividade do milho com carbono orgânico associado aos minerais (COAM) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B). 42
- Figura 7.** Gráficos de regressão da produtividade do milho com magnésio (Mg) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B)..... 42
- Figura 8.** Gráficos de regressão da produtividade do milho com cálcio (Ca) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B). 43
- Figura 9.** Gráficos de regressão da produtividade do milho com cálcio+magnésio (Ca+Mg) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B). 43
- Figura 10.** Gráfico de Análise de Componentes Principais (ACP), com as variáveis, produtividade, cálcio (Ca), magnésio (Mg), cálcio+magnésio (Ca+Mg), matéria orgânica do solo (MOS), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico particulado (COP) e estoque de carbono orgânico total (ECOT), na profundidade de 0-15 cm do solo. 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva dos indicadores de fertilidade do solo e da produtividade do milho.....	38
---	----

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	xv
1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 GERAL.....	18
2.2 ESPECÍFICOS.....	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 AGRICULTURA NOS SOLOS DOS TRÓPICOS ÚMIDOS NO MARANHÃO	19
3.2 O USO DE BIOMASSA VEGETAL ASSOCIADA COM GESSO NO SOLO.....	20
3.3 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO	21
3.4 INTERAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO (COS) E OS CÁTIOS POLIVALENTES.....	23
REFERÊNCIAS.....	24
CAPÍTULO II.....	29
1 INTRODUÇÃO	30
2 MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE COLETA.....	32
2.2 HISTÓRICO DAS ÁREAS DE COLETA.....	33
2.3 COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	34
2.4 ANÁLISES DOS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO	34
2.5 DETERMINAÇÃO DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DO MILHO.....	35
2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	35
3 RESULTADOS	37
3.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS.....	37
3.2 INTERAÇÃO DO COAM COM OS CÁTIOS POLIVALENTES	39
3.3 RELAÇÃO COAM:ARGILA	40
3.4 CORRELAÇÕES ENTRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO E OS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO.....	41
4 DISCUSSÃO	45
4.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS.....	45
4.2 INTERAÇÃO DO COAM COM OS CÁTIOS POLIVALENTES	45
4.3 RELAÇÃO COAM:ARGILA	46

4.4 CORRELAÇÕES ENTRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO E OS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO.....	47
4.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP).....	48
5 CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS.....	50
APÊNDICE	54

CAPÍTULO I

REFERENCIAL TEÓRICO

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura pode contribuir para enfrentar vários desafios socioambientais como: insegurança alimentar, mudanças climáticas, degradação dos recursos naturais etc. Para isso, as terras agrícolas precisam ser mais produtivas. Nesse contexto, a intensificação sustentável da agricultura permite obter bons resultados com relação ganha-ganha, benefícios simultâneos para o bem-estar humano e para os agroecossistemas, ou seja, maiores produtividades das culturas e eficiência ecológica (MOURA 2021a; TILMAN *et al.*, 2011; TURNER *et al.*, 2012; HOCHMAN *et al.*, 2013).

A respeito da produção de alimentos na região norte do Maranhão, especificamente os pequenos produtores ainda utilizam a agricultura itinerante, com práticas do pousio, corte e queima da vegetação para o estabelecimento dos cultivos agrícolas e pastagens (REGO, KATO, 2018). Os agricultores fazem uso dessa prática em virtude de questões culturais e restrições edafoclimáticas da região (AIPP; IWGIA, 2014; MOURA, 2021a).

A prática da agricultura itinerante resulta na camada superficial do solo rica em cinzas e nutrientes que fertiliza o solo e nutri as plantas que serão cultivadas (SANTÍN; DOERR, 2016). Porém, a agricultura itinerante promove maior emissão de gases do efeito estufa, desmatamento das florestas, induz a perda dos serviços ecossistêmicos e o processo de degradação dos solos pode ser acelerado devido ao encurtamento no tempo de pousio. A degradação do solo se dá: na redução do carbono do solo, fósforo, capacidade de troca catiônica, porosidade total, teor de água e na taxa de infiltração (VILLA *et al.*, 2021; VILLA *et al.*, 2020; PERES *et al.*, 2016; LOCH *et al.*, 2021; CELENTANO *et al.*, 2017).

Portanto, para intensificar a produção de alimentos de forma sustentável na região norte do Maranhão, se faz necessário o uso de práticas que fornecem serviços ecossistêmicos para os agroecossistemas, o cultivo de árvores de leguminosas é um exemplo de prática (MOURA, 2021a). Os serviços ecossistêmicos que podem ser fornecidos são: a produção de biomassa, fixação de nitrogênio (N), reciclagem de nutrientes e troca no fluxo do Carbono (C) da atmosfera para o solo. Dessa forma, a aplicação contínua da biomassa de leguminosas no solo promove a intensificação da produção agrícola na mesma área, previne novos desmatamentos, evita o uso ineficiente de nitrogênio, retarda a reaplicação de cálcio devido a reciclagem dos cátions básicos e resulta em uma agricultura mais viável (MOURA *et al.*, 2021b).

Nessa perspectiva, obter informações sobre a fertilidade do solo são indispensáveis para identificar o manejo adequado do solo e melhorar a produtividade das culturas (JONES *et al.*, 1982). Nos solos dos trópicos úmidos, especificamente no norte do Maranhão, a matéria

orgânica do solo (MOS) e a soma de cátions básicos como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), são uns dos principais indicadores de qualidade do solo utilizados para avaliar sustentabilidade e viabilidade nos agroecossistemas. Visto que, o clima tropical da região favorece a decomposição da (MOS) e a lixiviação dos cátions básicos (QUESADA *et al.*, 2020).

A hipótese deste estudo é que é possível determinar indicadores de qualidade do solo que se correlacionam com a produtividade da cultura do milho, diferentes dos indicadores presentes na literatura do Sudeste do Brasil. Portanto, o objetivo desse trabalho foi identificar os indicadores de fertilidade do solo do trópico úmido no norte do Maranhão que se correlacionam com a produtividade do milho.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Identificar os indicadores de fertilidade do solo do trópico úmido no norte do Maranhão que se correlacionam com a produtividade do milho.

2.2 ESPECÍFICOS

- Verificar a correlação da MOS e suas frações com os cátions polivalentes (cálcio e magnésio) em um solo tropical;
- Estabelecer o valor crítico do indicador que determina a relação carbono orgânico associado aos minerais COAM:argila;
- Analisar as correlações da produtividade do milho com os indicadores de fertilidade do solo;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 AGRICULTURA NOS SOLOS DOS TRÓPICOS ÚMIDOS NO MARANHÃO

Nos trópicos úmidos especificamente no norte do Maranhão, os solos possuem baixos teores de materiais agregadores como, carbono orgânico e ferro livre associados as frações minerais. Após repetidos ciclos de umedecimento e secagem, os solos de caráter coesos tornam-se duros (DANIELLS, 2012; MOURA *et al.*, 2009), resulta no aumento da resistência a penetração e pode impedir ou interromper o desenvolvimento futuro das plantas (MULLINS *et al.*, 1990), porque o sistema radicular das plantas é afetado negativamente pela redução do volume de solo explorado pelas raízes e prejudica a absorção de água e nutrientes (DANIELLS, 2012; MOURA *et al.*, 2013).

Quanto ao caráter químico dos solos da região, há baixa fertilidade natural, baixa capacidade de retenção de cátions básicos e alta intemperização (MOURA *et al.*, 2008a). Devido às características intrínsecas, esses solos são considerados estruturalmente frágeis (CASTRO, HERNANI, 2015).

Devido às restrições citadas acima, os pequenos agricultores da região norte do Maranhão efetuam práticas da agricultura itinerante como o corte e queima da vegetação nativa, ou seja, utilizam uma prática de baixa tecnologia para cultivarem alimentos como arroz, milho, mandioca e feijão (MOURA *et al.*, 2020a). No entanto, o sistema de corte e queima provoca emissão de gases do efeito estufa, perda de serviços ecossistêmicos, desmatamentos das florestas e degradação do solos (VILLA *et al.*, 2021; VILLA *et al.*, 2020; PERES *et al.*, 2016; LOCH *et al.*, 2021). Além disso, o crescimento populacional foi um dos fatores que induziram a períodos de pousio mais curtos entre as queimadas, o que diminui a cinza produzida e inviabiliza o sistema (AGUIAR *et al.*, 2009; CELENTANO *et al.*, 2017).

A melhoria e a manutenção da qualidade do solo é um fator primordial para assegurar a produtividade agrícola e qualidade ambiental para as futuras gerações (COSTA *et al.*, 2013). Dessa forma, aplicação de biomassa vegetal na superfície do solo pode ser uma alternativa para melhorar a produção de alimentos dos pequenos produtores nos trópicos úmidos, visto que, fornece serviços ecossistêmicos, permite substituir a agricultura itinerante nas regiões tropicais e intensifica o uso do solo (MOURA *et al.*, 2008b). Além disso, essa prática pode restabelecer

e manter a fertilidade do solo, mitigar o efeito das emissões atmosféricas de Carbono (C) e da queima de biomassa que retém C da matéria orgânica do solo (AGUIAR *et al.*, 2009).

3.2 O USO DE BIOMASSA VEGETAL ASSOCIADA COM GESSO NO SOLO

No sistema de cultivo em aleias modificado, plantas herbáceas, arbóreas ou arbustivas são podadas e a biomassa é aplicada na superfície solo nas áreas de cultivos agrícolas (KANG, 1997). Logo, a biomassa das árvores de leguminosas por exemplo fornece serviços ecossistêmicos como, a ciclagem de nutrientes, disponibilidade de nitrogênio (N), melhoria no pH do solo, aumento no teor de matéria orgânica, atividade biológica aprimorada e melhoria nas propriedades físicas do solo (SILESHI *et al.*, 2014). A biomassa das árvores de leguminosas são distinguidas pela qualidade, ou seja, biomassa de alta qualidade e biomassa de baixa qualidade. Biomassa de alta qualidade refere-se a biomassa de baixa relação C/N, baixos teores de lignina e polifenóis, já a biomassa de baixa de qualidade contém alta relação C/N e altos teores de lignina e polifenóis (YOUNG, 1997).

A *Tithonia diversifolia* é uma outra importante espécie que é usada nos cultivos em aleias e sua biomassa pode contribuir para a melhoria da fertilidade do solo nos agroecossistemas. Isso acontece em razão dos seus altos teores de nutrientes, nitrogênio, fósforo e potássio. Esta espécie é um herbácea da família Asteraceae, comumente encontrada nos trópicos úmidos e subúmidos, conhecida popularmente como margaridão amarelo (MUSTONEN *et al.*, 2012; RADOMSKI; OLIVEIRA, 2018).

Outra estratégia para fornecer biomassa vegetal para solo e superar o baixo teor de C orgânico, principalmente nos cultivos de culturas anuais como milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max*), arroz (*Oryza sativa*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*) seria o uso de culturas forrageiras como da espécie *Urochloa brizantha* (NETO *et al.*, 2021). Essa espécie conhecida como Braquiária brizantha tem uma alta produção de biomassa e possui uma boa ciclagem de macronutrientes no solo (MOMESSO *et al.*, 2019). Além disso, grande parte das braquiárias possuem alta relação C/N, ou seja, possuem menor taxa de decomposição, possibilitando o seu uso em regiões quentes onde a decomposição é acelerada (MONEGATI, 1991).

O sulfato de cálcio conhecido comumente como gesso agrícola fornece para as plantas os nutrientes cálcio (Ca) e enxofre (S), melhora as propriedades físicas e químicas do solo como: a estrutura do solo, reduz a toxicidade pelo alumínio (Al), promove maior

desenvolvimento do sistema radicular das plantas em profundidade, mantém o Ca e o S nas camadas mais profundas do perfil do solo e proporciona o aumento na disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, logo, beneficia o crescimento e o desenvolvimento das culturas (CHEN *et al.*, 2014; MOURA *et al.*, 2016). Além disso, o COS pode ser estabilizado pela interação com o cálcio, isso reflete na melhoria da qualidade do solo e pode proporcionar maiores produtividades das culturas (ELLERBROCK; GERKE, 2018; ROWLEY *et al.*, 2018; LAL, 2004).

Dessa forma, constatou-se que a biomassa produzida por árvores de leguminosas combinada com gesso tem apresentado bom potencial como alternativa para aumentar a produtividade e ao mesmo tempo favorecer a sustentabilidade nos agroecossistemas dos trópicos úmidos (MOURA *et al.*, 2018). Resultados encontrados por Sena *et al.* (2020), demonstraram que biomassa de árvores de leguminosas como a Gliricídia (*Gliricidia sepium*) podem colaborar para a intensificação agrícola sustentável no solo com baixa fertilidade natural que são comuns nos trópicos úmidos, a biomassa da Gliricídia melhorou o ambiente radicular, aumentou a fertilidade do solo e a absorção de N. Alguns autores verificaram ainda, que a cobertura do solo com biomassa de leguminosas foi eficaz para aumentar a absorção e a eficiência do uso do N em um solo coeso tropical. Portanto, a combinação de leguminosas de baixa e alta qualidade resultou em maiores rendimentos de grãos de milho (AGUIAR *et al.*, 2019).

Moura *et al.* (2020b), verificaram que o uso da biomassa de leguminosas em um solo tropical de estrutura frágil e saturado com cálcio proporcionou redução na resistência a penetração, induziu ao atraso da coesão e do endurecimento, promoveu maior enraizabilidade do solo, absorção de N e rendimento na produção de milho. Além disso, a aplicação da biomassa de leguminosas na superfície do solo promoveu o aumento na absorção de nitrogênio, nos teores de proteína do milho e no rendimento de grãos de milho (MARQUES *et al.*, 2017).

3.3 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

Indicadores de qualidade do solo são atributos do solo portadores de informações, ou seja, que medem ou refletem o status ambiental ou a condição de sustentabilidade do ecossistema. Dessa forma, são considerados bons indicadores aqueles que estão altamente correlacionados com a papel de interesse (REINHART *et al.*, 2015). Os indicadores de qualidade do solo permitem melhor monitoramento e gestão do solo, são fundamentais para

tomada de decisão e alcançar sustentabilidade na produção (TÓTH *et al.*, 2018). Conhecer a fertilidade do solo é a base para produzir, pois 95% da produção está relacionada com o solo diretamente ou indiretamente (PISMENNAYA *et al.*, 2020).

Os indicadores físicos, químicos e biológicos são imprescindíveis para avaliar a qualidade do solo e seu potencial (PRADO *et al.*, 2016). No geral, existem muitos indicadores que identificam com eficácia diferenças entre solos e práticas de manejo adotadas. Os indicadores mais utilizados são os indicadores físicos e químicos, no entanto, não existe um consenso sobre o uso de indicadores universais (ROUSSEAU *et al.*, 2012). Nessa perspectiva, a matéria orgânica é o indicador mais significativo para avaliar a qualidade dos solos dos trópicos úmidos porque a matéria orgânica aumenta a resiliência dos solos, que é a capacidade de recuperar sua integridade estrutural e funcional após processos de perturbações (SEYBOLD *et al.*, 1999). Além da MOS, suas frações, carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) são importantes indicadores, pois, os teores C dessas frações mudam facilmente com mudanças de sistema de uso e gestão do solo (LOSS *et al.*, 2013).

Na agricultura em geral, a MOS influencia em três dimensões na qualidade dos solos (física, química e biológica). Em relação a três dimensões, a física é considerada a mais importante para os solos tropicais devido à falta de outros materiais agregadores, sendo a matéria orgânica responsável pela manutenção das condições físicas desses solos como a formação de agregados, redução da densidade do solo e maior capacidade de retenção de água. A menor densidade do solo é devido a diluição da mistura da biomassa vegetal leve com a fração mineral densa e a maior capacidade de retenção de água é consequência da adição de MO que aumenta a área superficial específica e o número de pequenos poros (MOURA *et al.*, 2009; SILESHI *et al.*, 2014; ZANDONADI *et al.*, 2014;). Assim, maior retenção de água no solo reduz a resistência a penetração e melhora a enraizabilidade das plantas.

Do ponto de vista químico a MOS é fonte de nutrientes para a solução do solo, a capacidade de troca catiônica é aumentada, e conseqüentemente aumenta a retenção de cátions no solo e do ponto de vista biológico é fonte de energia metabólica para os microrganismos (SILESHI *et al.*, 2014; KOSOBUCKI, BUSZEWSKI, 2014; ZANDONADI *et al.*, 2014).

Especificamente nos solos da região norte do Maranhão, os principais indicadores que expressam a fertilidade natural são, os teores de carbono, fósforo e os cátions básicos (MOURA, 2021a). Nessa perspectiva, a matéria orgânica do solo (MOS) e a soma de cátions básicos como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), são uns dos principais indicadores de qualidade do

solo para avaliar sustentabilidade e viabilidade nos agroecossistemas. Visto que, pode ser atenuado os processos de decomposição da MOS e lixiviação dos cátions básicos (QUESADA *et al.*, 2020).

3.4 INTERAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO (COS) E OS CÁTIOS POLIVALENTES

Algumas práticas podem contribuir para a interação do COS com os cátions polivalentes (cálcio e magnésio) e resultar na estabilização da MOS. São elas: o aumento no teor de cátions polivalentes no solo, a aplicação de biomassa de alta qualidade na superfície do solo, pois os micróbios utilizam com melhor eficiência a biomassa e os produtos derivados da decomposição são considerados os principais percussores para estabilização da MOS, a fertilização com nitrogênio possibilita o aumento na atividade microbiana e o plantio direto com cobertura morta influencia no sequestro de COS (LÜTZOW *et al.*, 2006; COTRUFO *et al.*, 2013; SARKER *et al.*, 2017; KOU *et al.*, 2020).

A interação entre COS e os cátions polivalentes formam complexos organo-cátions, esse complexo de estabilização é considerado um dos mais importantes porque ocorre em todos os solos (ROWLEY *et al.*, 2018). De tal modo, no solo a MOS pode interagir com o cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe) e alumínio (Al) por associações. As associações que podem ocorrer no solo são, (i) organo-cátion associação da MO e cátions como o cálcio (Ca^{+2}), (ii) organo-cátion-mineral formam pontes de cátions entre o MO e os minerais e (iii) organo-mineral, ou seja, interação entre a MO e óxidos de Fe e Al. As interações promovem a relativa estabilização da MOS e difícil acesso para os microrganismos consumirem a MO como substrato (EDWARDS; BREMNER, 1967; ELLERBROCK; GERKE, 2018; SPOSITO, 2008).

Portanto, o COS estabilizado no solo permite, mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GEE), as mudanças climáticas, proporciona maior resiliência as práticas de manejo adotadas e conseqüentemente maior produtividade das culturas (OLADELE; ADETUNJI, 2020; LAL, 2004). Dessa forma, constatou-se por meio de análises estatísticas que as pesquisas destinadas a estudarem o aumento da produção de alimentos são vantajosas, principalmente para as áreas pobres da Amazônia (MENDOLA, 2007).

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Alana das Chagas Ferreira *et al.* How leguminous biomass can increase yield and quality of maize grain in tropical agrosystems. **Legume Research**, p. 1-7, 2019.
- AGUIAR, Alana das Chagas Ferreira *et al.* Environmental and agricultural benefits of a management system designed for sandy loam soils of the humid tropics. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1473-1480, 2009.
- AIPP & IWGIA, 2014. Shifting Cultivation, Livelihood and Food Security New and Old Challenges for Indigenous Peoples in Asia, Published by Asia Indigenous Peoples' Pact (AIPP) and the International Work Group for Indigenous Affairs (IWGIA), Chiang Mai.
- CASTRO, Selma Simões de; HERNANI, Luís Carlos. Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade. **Embrapa Solos-Livro Técnico (INFOTECA-E)**, 2015.
- CELENTANO, Danielle *et al.* Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in eastern Amazon of Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 2, p. 482-493, 2017.
- CHEN, Liming *et al.* Effects of gypsum on trace metals in soils and earthworms. **Journal of environmental quality**, v. 43, n. 1, p. 263-272, 2014.
- COSTA, Elaine Martins; SILVA, Helane França; RIBEIRO, Paula Rose de Almeida. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 1844, 2013.
- COTRUFO, M. Francesca *et al.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.
- DANIELLS, Ian G. Hardsetting soils: a review. **Soil research**. v. 50, p. 349-359, 2012.
- EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Microaggregates in solo 1. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 64-73, 1967.
- ELLERBROCK, Ruth H.; GERKE, Horst H. Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 5, p. 721-736, 2018.
- HOCHMAN, Zvi *et al.* Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. **European Journal of Agronomy**, v. 44, n. 0, p. 109-123, 2013.
- JONES, Ulysses S. *et al.* **Fertilizantes e fertilidade do solo**. Reston Publishing Co., Inc., 1982.

- KANG, B. T. Alley cropping—soil productivity and nutrient recycling. **Forest Ecology and Management**, v. 91, n. 1, p. 75-82, 1997.
- KOSOBUCKI, Przemysław; BUSZEWSKI, Bogusław. Natural organic matter in ecosystems—a review. **Nova Biotechnologica et Chimica**, v. 13, n. 2, p. 109-129, 2014.
- KOU, Xinchang *et al.* The frequency of straw mulching, but not the amount, regulates the decomposition pathways of soil micro-food webs in a no-till system. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 144, p. 107789, 2020.
- LAL, Rattan. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.
- LOCH, Vivian Do Carmo *et al.* Towards agroecological transition in degraded soils of the eastern Amazon. **Forests, Trees and Livelihoods**, v. 30, n. 2, p. 90-105, 2021.
- LOSS, Arcângelo *et al.* Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 50, n. 8, p. 685-693, 2013.
- LÜTZOW, M. *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. **European journal of soil science**, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.
- MARQUES, Georgiana Eurides Carvalho *et al.* Nitrogen use and protein yield of two maize cultivars in cohesive tropical soil. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, n. 3, p. 193-201, 2017.
- MENDOLA, Mariapia. Agricultural technology adoption and poverty reduction: A propensity-score matching analysis for rural Bangladesh. **Food Policy**, v. 32, n. 3, p. 372-393, 2007.
- MOMESSO, Letusa *et al.* Impacts of Nitrogen Management on Corn Production in No-Till After Forage Crops. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 2, p. 639-649, 2019.
- MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo: características e manejo em pequenas propriedades**. Chapecó, 1991. 336p.
- MOURA, Emanuel Gomes de. **Entre a Agricultura e a Ecologia, uma interface por onde transita a emancipação dos agricultores do trópico úmido**. São Luís. THEdesign. 2021a.
- MOURA, Emanuel Gomes *et al.* Could more efficient utilization of ecosystem services improve soil quality indicators to allow sustainable intensification of Amazonian family farming?. **Ecological Indicators**, v. 127, p. 107723, 2021b.
- MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Diversity of Rhizobia and Importance of Their Interactions with Legume Trees for Feasibility and Sustainability of the Tropical Agrosystems. **Diversity**, v. 12, n. 5, p. 206, 2020a.

MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Physiological and yield response in maize in cohesive tropical soil is improved through the addition of gypsum and leguminous mulch. **The Journal of Agricultural Science**, p. 1-8, 2020b.

MOURA, Emanuel Gomes de *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.

MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Improve agricultural practices for sustainable land use in the humid tropics and the health of the rainforest ecosystem. **Sustainability**, v. 8, n. 9, p. 841, 2016.

MOURA, Emanuel Gomes *et al.* A importância de uma alternativa para a sustentabilidade da agricultura na periferia da floresta amazônica. **Patentes recentes sobre alimentação, nutrição e agricultura**, v. 5, n. 1, p. 70-78, 2013.

MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Evaluation of chemical and physical quality indicators for a structurally fragile tropical soil. **Soil use and management**, v. 25, n. 4, p. 368-375, 2009.

MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Avaliação de um sistema de cultivo em aleias em um argissolo franco-arenoso da região amazônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4 p. 1735-1742, 2008a.

MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Crescimento e produtividade do milho em função da cobertura morta e do preparo do solo em sistemas de aleias. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 2, p. 204-208, 2008b.

MULLINS, C. E. *Et al.* Hardsetting soils: behavior, occurrence, and management. In: **Advances in Soil Science**. Springer, nova york, ny, 1990. P. 37-108.

MUSTONEN, Pedro S. Jorge; OELBERMAN, Maren; KASS, Donald CL. Usando *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray em um sistema de pousio curto para aumentar a disponibilidade de fósforo do solo em um Andosol da Costa Rica. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 2, pág. 91, 2012.

NETO, Jayme Ferrari *et al.* Frações de carbono e nitrogênio do solo e atributos físicos afetados pela correção da acidez do solo sob plantio direto em Latossolos no Brasil. **Geoderma Regional**, v. 24, p. e00347, 2021.

OLADELE S.O.; ADETUNJI A.T. Agro-residue biochar and N fertilizer addition mitigates CO₂-C emission and stabilized soil organic carbon pools in a rain-fed agricultural cropland. **International Soil and Water Conservation Research**, 2020.

PERES, Carlos A. *et al.* A limitação de dispersão induz o colapso de biomassa de longo prazo em florestas amazônicas sobre caçadas. **Anais da Academia Nacional de Ciências**, v. 113, n. 4, pág. 892-897, 2016.

PISMENNAYA, E. V. *et al.* Influence of technology without tillage on indicators of soil fertility in arid conditions of the South of Russia. In: **IOP conference series: earth and environmental science**. IOP Publishing, 2020. p. 022020.

PRADO, Rachel Bardy *et al.* Panorama atual e potenciais aplicações da abordagem dos serviços ecossistêmicos do solo no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1021-1038, 2016.

QUESADA, Carlos Alberto *et al.* Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. **Soil**, v. 6, n. 1, p. 53-88, 2020.

RADOMSKI, Maria Izabel; DE OLIVEIRA, Bruna Trajano. Produção de biomassa aérea e teor de nutrientes de *Erythrina speciosa* e *Tithonia diversifolia* cultivadas em Morretes, PR: resultados iniciais. **Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2018.

REGO, Anna Karyne Costa; KATO, Osvaldo Ryohei. Agricultura de corte e queima e alternativas agroecológicas na Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**, v. 20, n. 3, 2018.

REINHART, Kurt O. *et al.* Soil aggregate stability was an uncertain predictor of ecosystem functioning in a temperate and semiarid grassland. **Ecosfera**, v. 6, n. 11, pág. 1-16, 2015.

ROUSSEAU, Guillaume Xavier *et al.* Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: the potential of soil macrofauna assemblage. **Ecological indicators**, v. 23, p. 535-543, 2012.

ROWLEY, Mike C.; GRAND, Stéphanie; VERRECCHIA, Éric P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1-2, p. 27-49, 2018.

SANTÍN, Cristina; DOERR, Stefan H. Fire effects on soils: the human dimension. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 371, n. 1696, p. 20150171, 2016.

SARKER, Jharna Rani *et al.* Tillage and nitrogen fertilization enhanced belowground carbon allocation and plant nitrogen uptake in a semi-arid canola crop–soil system. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2017.

SENA, Virley Gardeny Lima *et al.* Ecosystem services for intensification of agriculture, with emphasis on increased nitrogen ecological use efficiency. **Ecosphere**, v. 11, p. 1-14, 2020.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, Jeffrey E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, v. 164, n. 4, p. 224-234, 1999.

SILESHI, Gudeta Weldesemayat *et al.* Agrossilvicultura: árvores de fertilizantes. **Enciclopédia de sistemas agrícolas e alimentares**, v. 1, p. 222-234, 2014.

SPOSITO, Garrison. **The chemistry of soils**. Oxford university press, 2008.

TILMAN, David *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Anais da Academia Nacional de Ciências**, v. 108, n. 50, pág. 20260-20264, 2011.

TÓTH, Gergely *et al.* Monitoring soil for sustainable development and land degradation neutrality. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 2, p. 1-4, 2018.

TURNER, Will R. *et al.* Global biodiversity conservation and the alleviation of poverty. **BioScience**, v. 62, n. 1, pág. 85-92, 2012.

VILLA, Pedro Manuel *et al.* Reducing intensification by shifting cultivation through sustainable climate-smart practices in tropical forests: A review in the context of UN Decade on Ecosystem Restoration. **Current Research in Environmental Sustainability**, v. 3, p. 100058, 2021.

VILLA, Pedro Manuel *et al.* Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+. **Forest policy and economics**, v. 118, p. 102217, 2020.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil management**. CAB International, London. ISBN: 0851991890. 1997. 320 p.

ZANDONADI, Daniel B. *et al.* Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 1, p. 14-20, 2014.

CAPÍTULO II

INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO DO TRÓPICO ÚMIDO QUE DETERMINAM A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem aumentado as preocupações ambientais sobre os sistemas de produção voltados para a intensificação convencional da agricultura. Nessa perspectiva, a agricultura baseada na intensificação ecológica busca implementar práticas que fornecem serviços ecossistêmicos e melhore a biodiversidade (KLEIJN *et al.*, 2019). Os serviços ecossistêmicos são significativos para agricultura porque podem melhorar os indicadores de qualidade do solo e contribuir para alcançar a sustentabilidade nos agroecossistemas (KLEIJN *et al.*, 2019; MOURA *et al.*, 2021a). Portanto, incentivar a intensificação sustentável tem por objetivo obter bons resultados econômicos, sociais e ambientais (PRETTY *et al.*, 2018).

Na região norte do estado do Maranhão para produzirem seus alimentos, especialmente os pequenos produtores enfrentam vários problemas relacionados a fatores climáticos como: a precipitação irregular e alta taxa de evapotranspiração potencial, que geram repetidos ciclos de umedecimento e secagem dos solos, tornando-os propensos a coesão (DENMEAD, SHAW, 1960; MOURA *et al.*, 2016a). E relacionados aos fatores edáficos: alguns solos dessa região possuem predominantemente, textura franco-arenosa, baixo teor de materiais agregadores como carbono orgânico e ferro livre (MENDES *et al.*, 2021; DANIELLS, 2012), baixa capacidade de retenção de cátions básicos e baixa fertilidade natural (MOURA *et al.*, 2008).

Em razão das restrições edafoclimáticas citadas, grande parte dos solos dos trópicos úmidos no Maranhão são incapazes de assegurar o cultivo por anos sucessivos. Por isso, os pequenos agricultores utilizam a agricultura itinerante, com práticas de pousio, corte e queima da vegetação, pois as cinzas disponibilizam nutrientes suficientes para sustentar pelo menos um ciclo de culturas anuais (FREITAS *et al.*, 2012). Porém, na agricultura itinerante a reposição de carbono (C) e nutrientes no solo é limitada, ocorre redução na estabilidade de agregados e induz a degradação do solo e uma busca incessante por novas áreas de cultivos (THOMAZ *et al.*, 2014; ZIEGLER *et al.*, 2009).

O uso de práticas como a implantação de árvores de leguminosas nos agroecossistemas no trópico úmido no Maranhão fornecem serviços ecossistêmicos como: produção de biomassa, fixação de nitrogênio (N), reciclagem de nutrientes e troca no fluxo do Carbono (C) da atmosfera para o solo (MOURA *et al.*, 2021b). Os serviços ecossistêmicos podem melhorar os indicadores de qualidade do solo. Dessa forma, especificamente nos solos dos trópicos úmidos no norte do Maranhão, os principais indicadores que expressam a fertilidade natural são, os teores de carbono, fósforo e os cátions básicos

(MOURA, 2021a). Logo, o teor de carbono (C) da matéria orgânica do solo (MOS) é o indicador mais significativo para avaliar a qualidade dos solos dos trópicos úmidos, porque a matéria orgânica aumenta a resiliência dos solos, que é a capacidade de recuperar sua integridade estrutural e funcional após processos de perturbações (SEYBOLD *et al.*, 1999). Além disso, o COS pode ser estabilizado pela interação com o cálcio, que reflete na melhoria da qualidade do solo e pode proporcionar maiores produtividades das culturas (ELLERBROCK; GERKE, 2018; ROWLEY *et al.*, 2018; LAL, 2004).

A hipótese deste estudo é que é possível determinar indicadores de qualidade do solo que se correlacionam com a produtividade da cultura do milho, diferentes dos indicadores presentes na literatura do Sudeste do Brasil. Portanto, o objetivo desse trabalho foi identificar os indicadores de fertilidade do solo do trópico úmido no norte do Maranhão que se correlacionam com a produtividade do milho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE COLETA

As amostras de solo foram coletadas na comunidade Quilombola Santa Rita do Vale, no município de Santa Rita, região norte do estado do Maranhão, Brasil. A área está localizada entre as coordenadas: latitude $3^{\circ} 8' 49''$ Sul e longitude $44^{\circ} 19' 11''$ Oeste, com uma altitude de 28 metros do nível do mar (Figura 1).

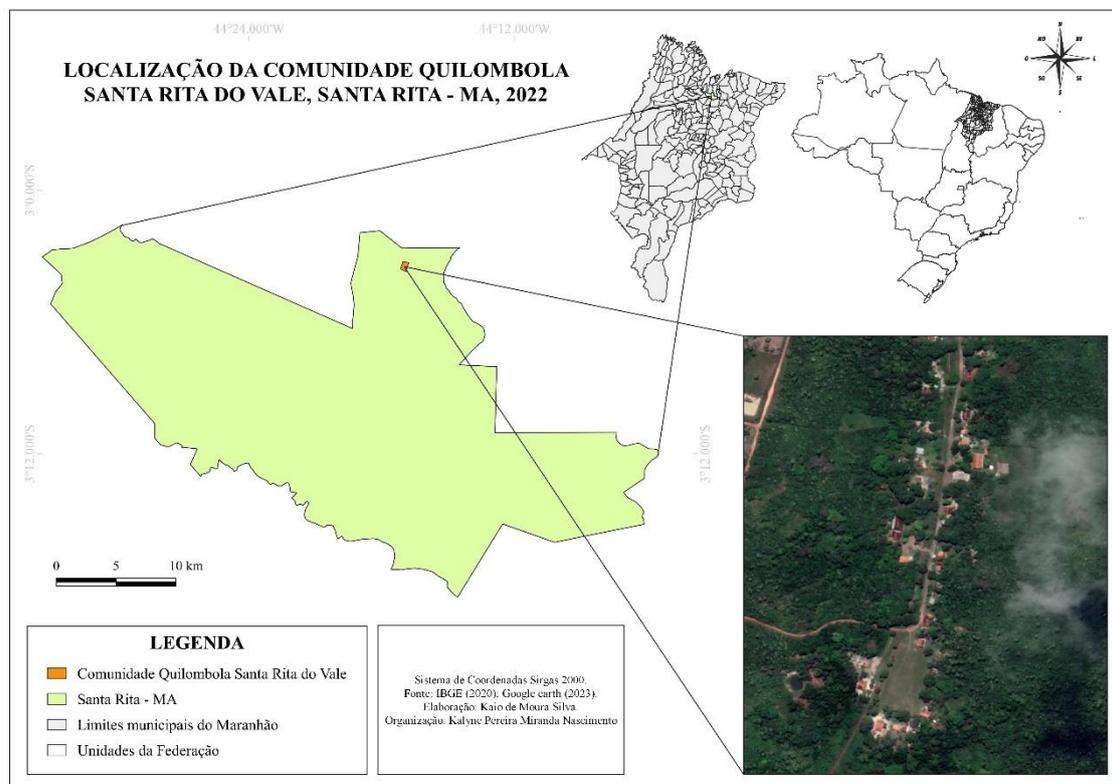


Figura 1. Localização das áreas de coleta na comunidade Quilombola Santa Rita do Vale, no município de Santa Rita, região norte do estado do Maranhão.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw tropical úmido, com duas estações do ano bem definidas, uma estação chuvosa que se estende de janeiro a junho e uma estação seca com um déficit hídrico acentuado que se estende de julho a dezembro. A precipitação média anual é acima de 2.117,10 mm, e a temperatura média anual é de 27°C , com mínima de 22°C e máxima de 36°C (INMET, 2022).

Geograficamente, o município está localizado na Formação Itapecuru, formada no Cretáceo Superior. A formação geológica de Itapecuru é caracterizada, principalmente, de

arenitos finos argilosos ou muito argilosos ricos em argila do grupo das caulinitas, às vezes intercalados por folhelhos. Sua morfologia típica é representada por colinas de topos arredondados, com altitudes baixas ao redor de 30 a 60 metros (MOURA, 2004). O solo da área de estudo foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrocoeso, com textura franco-arenosa (SANTOS *et al.*, 2018).

2.2 HISTÓRICO DAS ÁREAS DE COLETA

Nas duas áreas que foram coletadas as amostras de solo para pesquisa, os produtores afirmam que há cinco anos prevalecia a vegetação de capoeira sem antecedentes de uso agrícola ou pecuário e que a partir desse período, os produtores roçaram as áreas e realizaram a aplicação superficial de calcário (2 Mg ha^{-1}) e em seguida a aplicação de gesso agrícola (6 Mg ha^{-1}). O intuito da gessagem foi aumentar o teor de cálcio na zona radicular.

Depois desse processo de preparo do solo, os produtores cultivaram as espécies margaridão amarelo (*Tithonia diversifolia*), sombreiro (*Clitoria fairchildiana*) e capim braquiária (*Urochloa brizantha* cv. Marandu). Sendo que o margaridão amarelo e sombreiro foram cultivados em fileiras, com espaçamento de 0,5 m entre plantas e 4 m entre linhas e o capim braquiária cultivado por toda a área. É importante registrar que essas espécies foram cultivadas com o interesse fornecer biomassas para melhorar a qualidade do solo.

Ainda, segundo os produtores das áreas, a poda dos ramos das plantas ocorreu pela primeira vez em janeiro de 2016, com cortes anuais em janeiro de cada ano a uma altura de aproximadamente 50 cm. A partir de então, o milho (*Zea mays* L.) passou a ser cultivado durante a estação chuvosa sob o sistema de plantio direto nas entrelinhas das plantas. A adubação realizada em cada ano de cultivo do milho foi, $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$, $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ e $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Zn}$. Além disso, 100 kg ha^{-1} de ureia, dividida em duas aplicações: no estágio V3 e no estágio VT (pendoamento).

2.3 COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO

Para pesquisa, em abril de 2021 foram coletadas amostras de solo em duas áreas com diferentes biomassas aplicadas na superfície do solo. A coleta realizada nas diferentes áreas foi para obter maior variação no conjunto de dados. Cada área possuía um tamanho de 1.680 m². Foram avaliados um total de 24 pontos em cada profundidade do solo. As profundidades avaliadas foram entre 0-15 cm e 15-30 cm do solo. Cada ponto de amostragem continha uma grade de 7x10 m. . Em cada ponto, foram coletadas quatro amostras simples com o trado holandês, cada uma com uma distância de dois metros para o ponto central, para formar uma amostra composta.

Nas áreas o milho (*Zea mays* L.) cultivar AG 7088 foi cultivado na estação chuvosa de janeiro a maio de 2021, em sistema de plantio direto, com espaçamento de 1 m entre linhas e 0,20 m entre plantas.

2.4 ANÁLISES DOS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO

Para determinar os indicadores de fertilidade do solo, as amostras de solo foram secas ao ar e passadas em uma peneira de 2 mm, para determinar os seguintes indicadores: cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) de acordo com a metodologia de Teixeira et al. (2017). O cálcio e magnésio trocáveis foram extraídos com solução de KCl 1mol L⁻¹. O cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

Para avaliar as frações da matéria orgânica, foi realizado o fracionamento granulométrico da matéria orgânica de acordo com Cambardella e Elliott (1992). O método tem como objetivo separar o carbono orgânico do solo em duas frações: carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM). As amostras de solo foram secas ao ar e 20 g foram peneiradas em malha de 2 mm e pesadas em copos de polietileno de 250 ml, em seguida foram adicionados 80 ml de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹) às amostras de solo. A mistura de cada amostra foi agitada por 15 h em agitador horizontal, com 130 oscilações min⁻¹. Após o processo de agitação, todo o conteúdo de cada amostra foi colocado em uma peneira de malha de 0,053 mm e lavado com jato fraco de água destilada até a remoção completa da argila, em seguida o material foi seco a 50°C em estufa. Após a secagem, uma quantidade do material foi macerado em um cadinho de porcelana e as amostras foram

pesadas para determinar o teor de C, que representa o (COP).

O teor de carbono orgânico total (COT) foi obtido pelo método de oxidação via úmida, de acordo com (YEOMANS; BREMNER, 1988) e o teor de carbono orgânico associado a minerais (COAM) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total (COT) e o carbono orgânico particulado (COP) de acordo com a seguinte fórmula:

COM= COT- COP. A matéria orgânica do solo (MOS) foi obtida multiplicando o COT por 1,74.

Foi avaliado ainda o estoque de C de acordo com Veldkamp (1994):

$$ECOT = (COT \times Ds \times e) / 10$$

Onde: ECOT = estoque de carbono orgânico total em determinada profundidade ($Mg \text{ ha}^{-1}$);

COT = teor de C orgânico total na profundidade amostrada ($g \text{ kg}^{-1}$);

Ds = densidade do solo da profundidade ($kg \text{ dm}^{-3}$);

e = espessura da camada considerada (cm);

Foi avaliada a composição granulométrica do solo, para obter os teores de argila (partículas menores que 0,002mm), silte (partículas entre 0,002 e 0,050mm) e areia (partículas entre 0,200 e 2,000mm). Foram separadas por tamisação e determinados pelo método da pipeta (Teixeira *et al.*, 2017).

2.5 DETERMINAÇÃO DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DO MILHO

A determinação do rendimento do milho foi realizada em uma área de 4 m^2 (2m x 2m) ao redor de cada ponto de amostragem na fase de maturidade fisiológica do milho. Foram coletadas 15 espigas de milho próximo de cada ponto amostral. Os dados de produtividade foram calculados quando o milho alcançou 13% de umidade. Foram avaliados os componentes de rendimento, peso médio das espigas e produtividade por ponto, conforme metodologia de Fageria *et al.* (1989).

2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados foram submetidos a análise descritiva com os valores (mínimo, máximo, mediana, média, assimetria, curtose e desvio padrão). Foram submetidos também, aos testes de homogeneidade de variância (teste de Levene) e de normalidade (Shapiro-Wilk) para gerar as

regressões lineares simples a 5% de probabilidade. Para avaliar a correlação geral do conjunto de dados foi realizada a análise de componentes principais (ACP). O programa estatístico utilizado para realizar as análises estatísticas foi o R versão 4.1.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021).

3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Na análise descritiva os valores de média e mediana para todas as variáveis apresentaram aproximação. Dessa forma, os dados revelam distribuição próxima da normalidade. Além disso, os valores de assimetria da maioria dos indicadores variaram de -0,35 a 0,85, confirmando a distribuição simétrica dos dados que varia de -1 a +1. (Tabela 1).

Sabe-se que o desvio padrão (DP) explica o grau de dispersão do conjunto de dados e que dados mais próximos de zero possuem menor grau de dispersão. Na pesquisa, a variável que apresentou maior grau de dispersão dos dados foi cálcio+magnésio (Ca+Mg) nas duas profundidades do solo (Tabela 1).

A produtividade variou de 4,41 Mg ha⁻¹ a 12,51 Mg ha⁻¹. A MOS alternou entre 13,87 g kg⁻¹ a 26,52 g kg⁻¹ na profundidade de 0-15 cm e na profundidade de 15-30 cm a variação foi de 10,13 g kg⁻¹ a 19,28 g kg⁻¹. O carbono orgânico particulado (COP) variou sete vezes mais do ponto mínimo para o ponto máximo na profundidade de 0-15 cm e seis vezes mais na profundidade de 15-30 cm. O carbono orgânico total (COT) alternou entre 7,97 g kg⁻¹ a 15,24 g kg⁻¹ na profundidade de 0-15 cm e na profundidade de 15-30 cm a variação foi de 5,82 g kg⁻¹ a 9,80 g kg⁻¹ (Tabela 1).

Já o carbono orgânico associado aos minerais (COAM) variou 10 vezes mais do ponto mínimo para o ponto máximo na profundidade de 0-15 cm e de 15-30 cm a variação foi de sete vezes mais. No estoque de carbono orgânico total (ECOT) houve uma variação de quase duas vezes mais do ponto mínimo para o ponto máximo na profundidade de 0-15 cm e na profundidade de 15-30 cm a variação foi duas vezes maior. O cálcio teve variabilidade de quase três vezes mais na profundidade de 0-15 cm do solo e mais de três vezes na camada de 15-30 cm do solo. A variação do magnésio foi vinte e duas vezes maior do ponto mínimo para o ponto máximo na profundidade de 0-15cm e na camada de 15-30 cm do solo a variabilidade foi de treze vezes mais. A variação do Ca+Mg foi de 13,60 mmol_c dm⁻³ a 39,80 mmol_c dm⁻³ na profundidade de 0-15 cm e de 4,20 mmol_c dm⁻³ a 19,00 mmol_c dm⁻³ na profundidade de 15-30 cm (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva dos indicadores de fertilidade do solo e da produtividade do milho.

Variáveis	Min.	Máx.	Mediana	Média	Assimetria	Curtose	DP
0-15cm							
Produtividade (Mg ha ⁻¹)	4,41	12,51	7,14	7,47	0,79	0,11	2,04
MOS (g Kg ⁻¹)	13,87	26,52	19,39	19,62	0,31	-0,22	2,93
COP (g Kg ⁻¹)	1,64	11,58	5,75	6,29	0,15	-1,36	3,11
COT (g Kg ⁻¹)	7,97	15,24	11,37	11,58	0,41	-0,25	1,51
COAM (g Kg ⁻¹)	1,10	11,58	4,70	5,30	0,30	-1,33	3,16
ECOT (Mg ha ⁻¹)	15,97	31,59	25,87	25,29	-0,35	-0,62	3,98
Ca (mmol _c dm ⁻³)	9,40	27,80	17,25	18,01	0,15	-1,23	5,18
Mg (mmol _c dm ⁻³)	0,60	13,30	5,90	6,37	0,13	-1,14	3,68
Ca+Mg (mmol _c dm ⁻³)	13,60	39,80	24,00	24,38	0,21	-1,33	8,11
15-30cm							
MOS (g Kg ⁻¹)	10,13	19,28	14,27	14,02	0,25	-0,71	2,53
COP (g Kg ⁻¹)	1,21	8,09	4,40	4,48	0,01	-1,47	2,27
COT (g Kg ⁻¹)	5,82	9,80	7,82	7,87	-0,21	-0,51	0,98
COAM (g Kg ⁻¹)	1,02	7,93	3,47	3,63	0,38	-0,15	1,68
ECOT (Mg ha ⁻¹)	10,85	27,33	18,02	18,06	0,16	-1,05	4,65
Ca (mmol _c dm ⁻³)	3,10	14,90	7,75	8,14	0,60	-0,06	2,77
Mg (mmol _c dm ⁻³)	0,50	6,60	2,35	2,54	0,85	0,11	1,56
Ca+Mg (mmol _c dm ⁻³)	4,20	19,00	10,50	10,68	0,52	-0,17	3,68

Valor mínimo (Min.), valor máximo (Máx.) e Desvio padrão (DP)

3.2 INTERAÇÃO DO COAM COM OS CÁTIOS POLIVALENTES

O carbono orgânico associado aos minerais (COAM) correlacionou positivamente com o cálcio (Ca), magnésio e cálcio+magnésio (Ca+Mg) (Figura 2A, Figura 2B, Figura 3A, Figura 4A e Figura 4B). Desse modo, a cada aumento em $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de cálcio na profundidade de 0-15 cm incrementou $0,46 \text{ g kg}^{-1}$ de COAM no solo. Na profundidade de 15-30 cm cada aumento de $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de cálcio no solo aumentou $0,32 \text{ g kg}^{-1}$ de COAM (Figura 2A e Figura 2B).

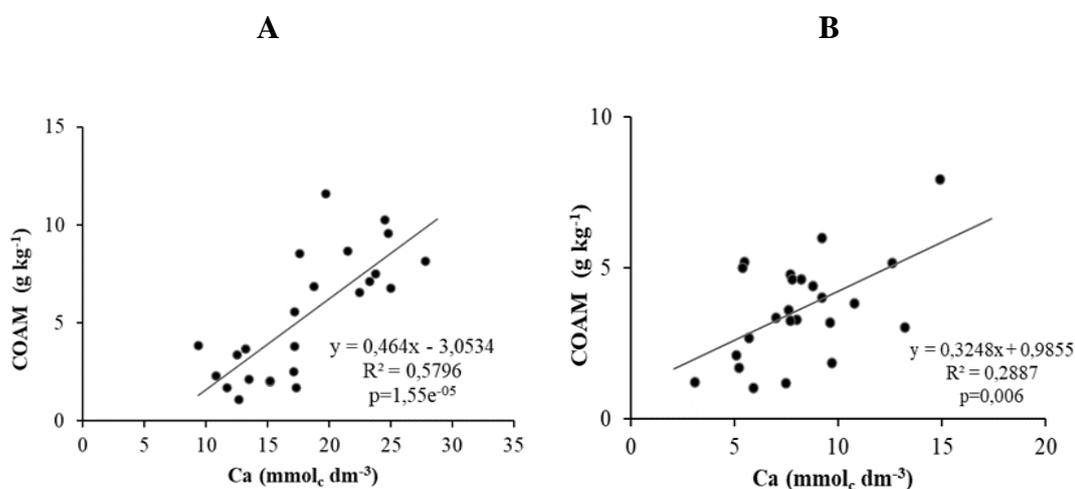


Figura 2. Gráficos de regressão do carbono orgânico associado aos minerais (COAM) com cálcio (Ca) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B).

Além disso, a cada aumento de $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de magnésio na amostragem de 0-15 cm do solo consistiu no acréscimo de $0,92 \text{ g kg}^{-1}$ de COAM no solo (Figura 3).

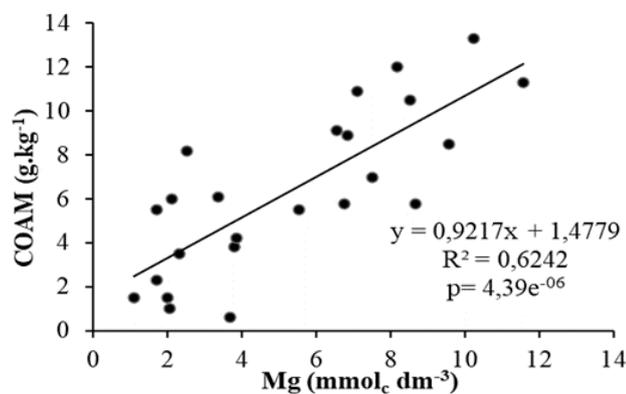


Figura 3. Gráfico de regressão do carbono orgânico associado aos minerais (COAM) com magnésio (Mg) na profundidade de 0-15 cm do solo.

Para o indicador Ca+Mg cada aumento de $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na profundidade de 0-15 cm acrescentou $0,33 \text{ g kg}^{-1}$ de COAM no solo. Na camada de 15-30 cm o aumento de $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca+Mg incrementou $0,24 \text{ g kg}^{-1}$ de COAM no solo (Figura 4A e Figura 4B).

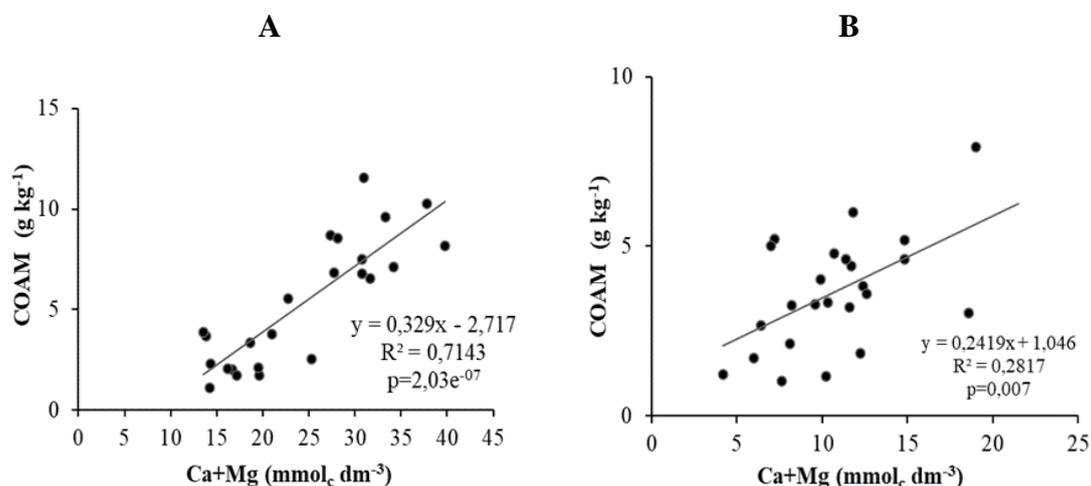


Figura 4. Gráficos de regressão de carbono orgânico associado aos minerais (COAM) com cálcio+magnésio (Ca+Mg) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B).

A variável COT apresentou baixa correlação positiva e não significativa com as variáveis Ca, Mg e Ca+Mg nas duas profundidades. Dados não apresentados.

3.3 RELAÇÃO COAM:ARGILA

Para determinação do grau de sustentabilidade do solo dos agrossistemas a metodologia de Johannes et al (2017) que utiliza a razão COS:argila designa que, a relação COS:argila de 1:8 o solo é considerado de qualidade estrutural muito boa, a relação COS:argila de 1:10 o solo é considerado de qualidade estrutural boa e a relação 1:13 o solo é considerado pobre estruturalmente. Nessa perspectiva, o grau de sustentabilidade do solo estudado é bom, pois tem o teor de argila de 115 g kg^{-1} e de COAM de $11,50 \text{ g kg}^{-1}$. Para conservar o teor de COAM no solo de $11,50 \text{ g kg}^{-1}$ o limite crítico de Ca+Mg deve ser de $41 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, isso porque o teor de cátions polivalentes é passível de mudanças no solo a qualquer momento diferente do teor de COAM (Figura 5).

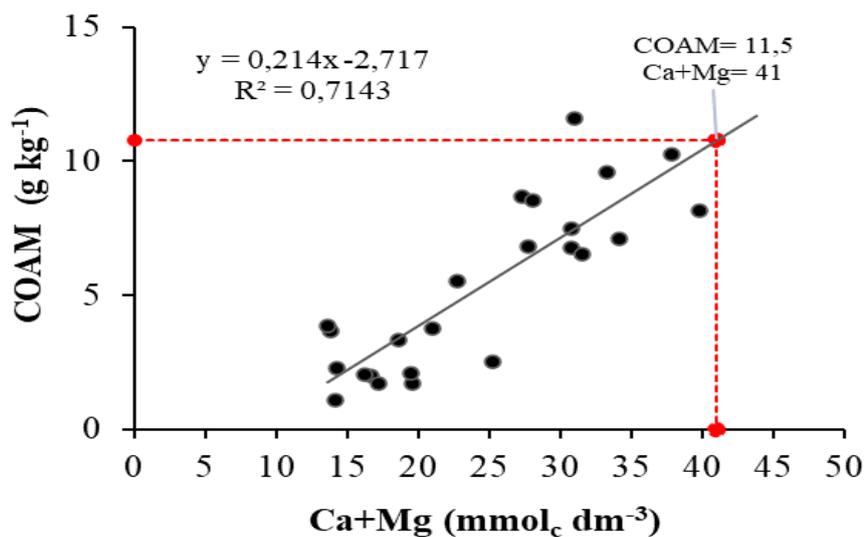


Figura 5. Gráfico do limite crítico de cálcio+magnésio para o teor de COAM de 11,50 g kg⁻¹

3.4 CORRELAÇÕES ENTRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO E OS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO

A produtividade do milho correlacionou positivamente com o carbono orgânico associado aos minerais (COAM), fração estável da MOS, nas duas profundidades do solo. Assim, a cada aumento de 1 g kg⁻¹ de COAM na profundidade de 0-15 cm no solo incrementou em 517 kg na produtividade do milho por hectare. Portanto, o máximo valor de COAM 11,58 g kg⁻¹ beneficiou no valor de produtividade de 10,71 Mg ha⁻¹. A cada aumento de 1 g kg⁻¹ de COAM no solo na camada de 15-30 cm significou um acréscimo de 491 kg ha⁻¹ na produtividade (Figura 6A e Figura 6B).

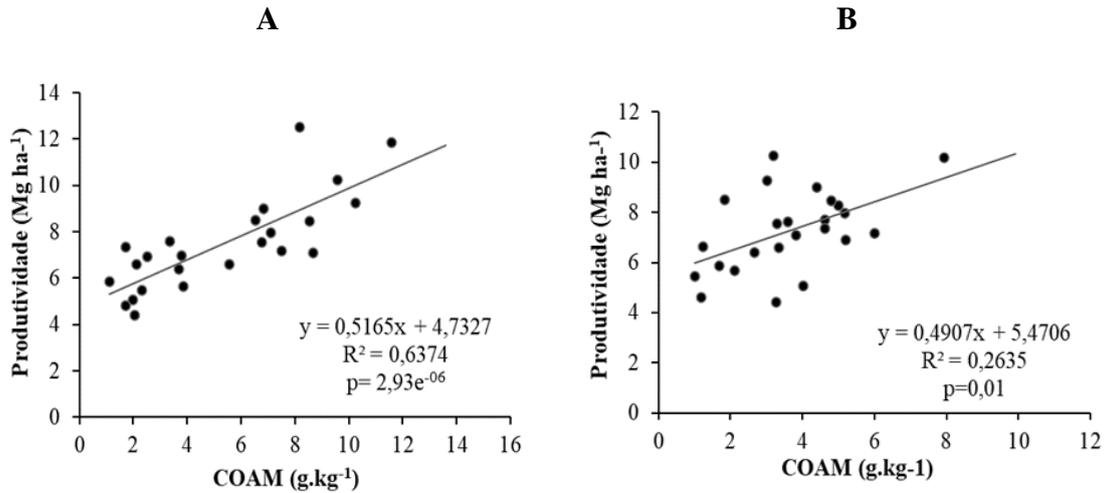


Figura 6. Gráficos de regressão da produtividade do milho com carbono orgânico associado aos minerais (COAM) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B).

Constatou-se correlações positivas significativas da produtividade do milho com os indicadores, magnésio (Mg), cálcio (Ca) e cálcio+magnésio (Ca+Mg) nas duas profundidades do solo (Figura 7A, Figura 7B, Figura 8A, Figura 8B, Figura 9A e Figura 9B). Foi observado maior correlação positiva da produtividade com indicadores de fertilidade na profundidade de 0-15 cm do solo.

Portanto, cada acréscimo de 1 mmol_c dm⁻³ de Mg na amostragem de 0-15 cm do solo significou um acréscimo de 466 kg ha⁻¹ na produtividade do milho. Na amostragem de 15-30 cm do solo cada aumento de uma unidade de Mg representou um aumento 468 kg ha⁻¹ na produtividade do milho (Figura 7A e Figura 7B).

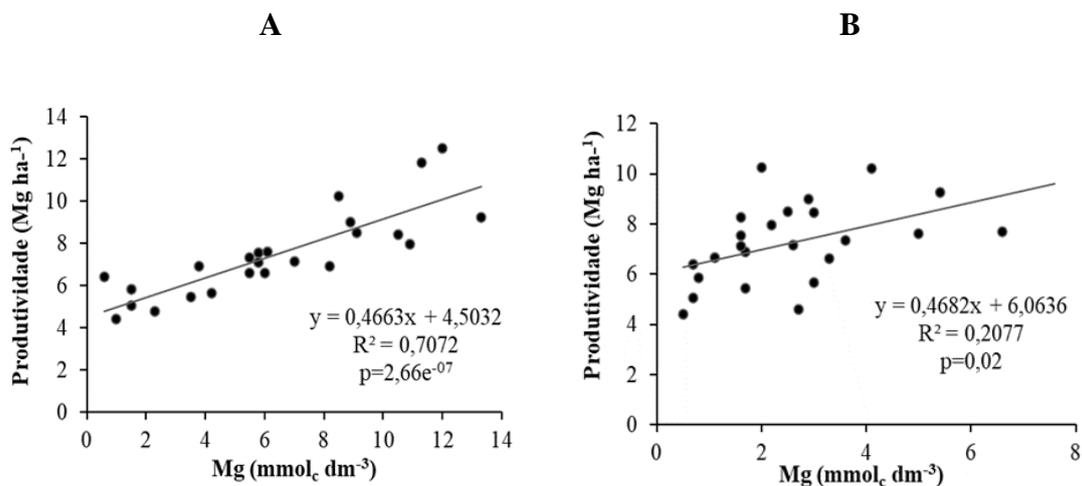


Figura 7. Gráficos de regressão da produtividade do milho com magnésio (Mg) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B).

Na correlação da produtividade com cálcio a cada acréscimo de $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de cálcio na amostragem de 0-15 cm representou um incremento de 258 kg ha^{-1} na produtividade do milho e na amostragem de 15-30 cm um aumento de 323 kg ha^{-1} na produtividade (Figura 8A e Figura 8B).

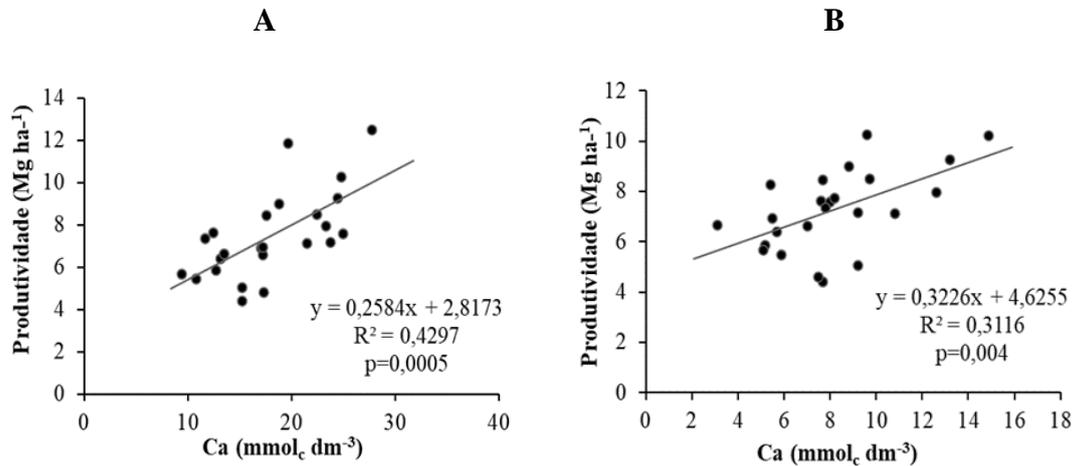


Figura 8. Gráficos de regressão da produtividade do milho com cálcio (Ca) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B).

Além disso, na correlação da produtividade com Ca+Mg o aumento de cada $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca+Mg no solo significou um aumento de 202 kg ha^{-1} na produtividade do milho na amostragem de 0-15 cm. Assim como, o aumento de cada unidade de Ca+Mg na profundidade de 15-30 cm aumentou 268 kg ha^{-1} na produtividade (Figura 9A e Figura 9B).

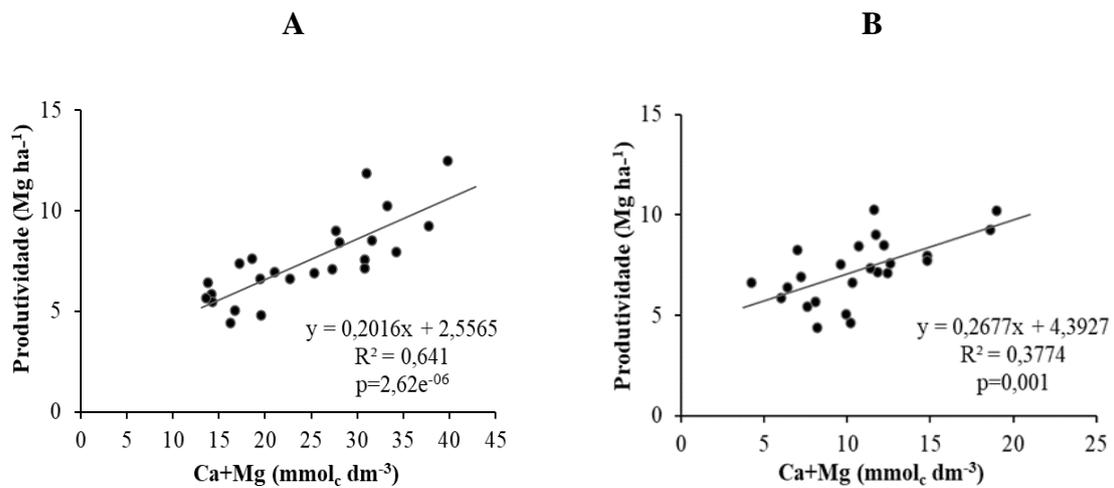


Figura 9. Gráficos de regressão da produtividade do milho com cálcio+magnésio (Ca+Mg) na profundidade de 0-15 cm (A) e 15-30 cm do solo (B).

3.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

A análise de componentes principais (ACP) foi usada para visualizar em uma dimensão geral as correlações entre as variáveis na área de estudo na profundidade de 0-15 cm do solo (Figura 10). Os dois primeiros componentes principais PC1 e PC2 explicaram 86,60% da variação do conjunto de dados. De acordo com os resultados, as variáveis produtividade, COAM, Mg, Ca+Mg, Ca e COP apresentaram maior explicação no PC1. No geral, a variável produtividade apresentou forte correlação positiva com, COAM, Ca, Mg e Ca+Mg. Por outro lado, os atributos MOS, COT e ECOT, apresentaram maior explicação no PC2. A MOS, COT e ECOT se correlacionaram positivamente.

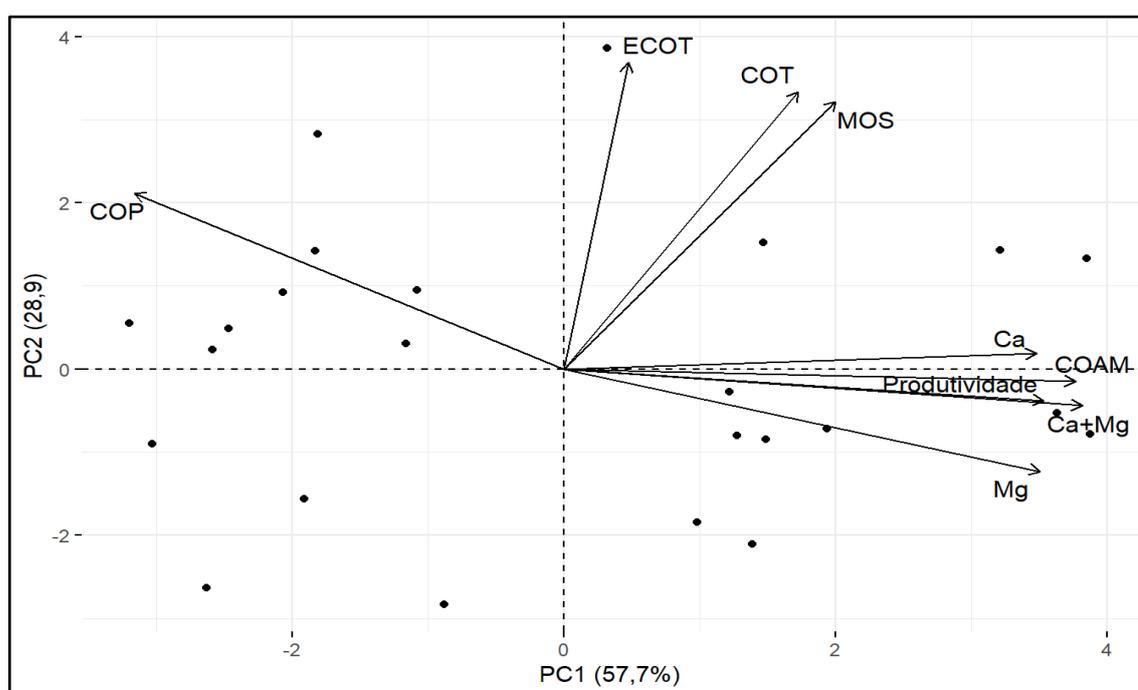


Figura 10. Gráfico de Análise de Componentes Principais (ACP), com as variáveis, produtividade, cálcio (Ca), magnésio (Mg), cálcio+magnésio (Ca+Mg), matéria orgânica do solo (MOS), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico particulado (COP) e estoque de carbono orgânico total (ECOT), na profundidade de 0-15 cm do solo.

4 DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

As coletas de solo realizadas nas duas áreas foram suficientes para mostrar uma variação no conjunto de dados. Com a variação dos dados de produtividade, identificou-se oportunidade para melhorar a produtividade nos pontos mínimos. Pois, toda a área tinha que produzir 12,51 Mg ha⁻¹. A oportunidade referida está relacionada ao aumento do teor dos indicadores que aumentam a produtividade.

A variação dos dados nos pontos mínimos e máximos no ECOT, permite mostrar oportunidade para sequestrar carbono nos pontos mínimos por meio do aumento no teor de cátions polivalentes no solo. A fração estável carbono orgânico associado aos minerais contribuiu mais que a fração carbono orgânico particulado no carbono orgânico total. Assim, o maior teor de carbono orgânico associado aos minerais influencia no armazenamento de carbono no solo a longo prazo. O carbono sequestrado permite melhorar a qualidade do solo e reduzir as emissões de CO₂ para mitigar as mudanças climáticas (SCHRAG, 2007; LAVALLEE *et al.*, 2020).

4.2 INTERAÇÃO DO COAM COM OS CÁTIOS POLIVALENTES

A correlação positiva do COAM com cálcio, magnésio e cálcio+magnésio devem ser consideradas como resultados das interações do COAM com os cátions polivalentes, como o cálcio e magnésio. Resultados obtidos por Sena *et al.* (2020), que trabalharam com a aplicação da biomassa Gliricídia na superfície do solo também verificaram efeitos positivos do carbono orgânico e cátions básicos na zona radicular do solo.

De acordo com Rowley *et al.* (2021), solos enriquecidos com cálcio teve o teor de COAM duas vezes maior devido a formação das pontes de cátions. Isso ocorre porque, o COAM e cátions polivalentes, como cálcio, se unem aos grupos funcionais da MOS, como por exemplo, o grupo carboxila com ligações duplas (C=O) e grupos de hidroxilas e polissacarídeos de ligação simples (C–O–C) para formarem pontes de cátions (ELLERBROCK; GERKE, 2018; ROWLEY *et al.*, 2018; LÜTZOW *et al.*, 2006). Dessa forma, os cátions polivalentes

neutralizam os grupos funcionais da MOS (LÜTZOW *et al.*, 2006). Esta reação confere maior estabilização da MOS contra a decomposição microbiana, que reflete no seu acúmulo e permanência no solo (ELLERBROCK; GERKE, 2018; ROWLEY *et al.*, 2018; MOORE; TURUNEM, 2004). Assim, o COS tende a estar relacionado com o cálcio adsorvido aos grupamentos funcionais da MOS (ELLERBROCK; GERKE, 2018).

Portanto, o COS estabilizado pela interação com os cátions polivalentes permanece sequestrado no solo. Por isso, permite mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GEE), as mudanças climáticas, proporciona maior resiliência do solo às práticas de manejo adotadas oportunizando cultivos sucessivos na mesma área e maiores produtividades das culturas (OLADELE; ADETUNJI, 2020; IWATA *et al.*, 2021).

4.3 RELAÇÃO COAM:ARGILA

De acordo com Johannes *et al.* (2017), a relação COS: argila designa a qualidade estrutural do solo. O COS e a argila determinam a qualidade estrutural do solo porque ambos influenciam diretamente nos atributos físicos do solo (KAY, 2018). A MOS correlaciona com muitos atributos físicos como, densidade do solo, porosidade do solo e resistência a penetração (JOHANNES *et al.*, 2017; KAY, 2018). A argila está relacionada com a formação de agregados, que são componentes estruturais do solo que influenciam na manutenção da porosidade total, na aeração do solo e no crescimento das plantas (CAMARGO, ALLEONI, 2006; OADES, 1984).

No presente trabalho, a relação COS:argila foi determinada usando a fração COAM. Isso porque o COAM contribuiu mais que a fração COP no COT. Dado que, quanto maior a proporção da fração estável COAM, maior é a capacidade do solo de suportar cultivo sucessivos e evitar a degradação dos solos (IWATA *et al.*, 2021).

Segundo Johannes *et al.* (2017), para avaliar a qualidade estrutural do solo deve estabelecer critérios para gerir o teor de COS. Portanto, definir o limite crítico do indicador que correlaciona com o teor de COAM no solo pode determinar o grau de degradação dos solos. Nesse sentido, a razão COS:argila foi proposta como um indicador que liga o COS a estrutura do solo, e um solo com boa estrutura é a base para um bom funcionamento para produzir (PROUT *et al.*, 2021).

Portanto, na realidade dos solos dos trópicos úmidos no norte do Maranhão, o aumento e manutenção da matéria orgânica no solo devem ser incentivados para melhorar os indicadores de fertilidade do solo e possibilitar altos rendimentos agrícolas. Porque o aumento no teor de COS pode contribuir para a intensificação agrícola, impedir desserviços como os desmatamentos de novas áreas realizado na agricultura de corte e queima, mitigar o efeito do aquecimento global e melhorar a qualidade dos solos agricultáveis (MOURA *et al.*, 2021b; WALTHALL *et al.*, 2013).

4.4 CORRELAÇÕES ENTRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO E OS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO

A correlação positiva do COAM com a produtividade do milho pode ser atribuída ao fato de que, o COAM é um elemento agregante das partículas minerais do solo e pode promover condições ideais para o crescimento do sistema radicular, aumento na eficiência da absorção dos nutrientes e conseqüentemente, proporciona altos rendimentos das culturas (RUBIO *et al.*, 2021, LAL, 2020). Segundo Oldfield *et al.* (2019), as concentrações de COS estão associadas a maiores rendimentos das culturas até uma determinada concentração de COS. Dessa forma, a MOS possui papel fundamental em solos tropicais e altamente intemperizados para manter a fertilidade do solo e a produtividade das culturas (TIECHER, 2015).

Nesse estudo, os íons cálcio e magnésio estão associados preferencialmente com a fração estável da matéria orgânica COAM. Os cátions polivalentes por serem carregados positivamente formam pontes com MOS que está carregada negativamente o que resulta na permanência da MOS (CORTUFO *et al.*, 2013). Portanto, solos enriquecidos com cálcio possuem maiores teores de COAM, conseqüentemente, maior agregação, melhor estrutura, maior capacidade de troca catiônica, maior retenção de cátions básicos no solo e como efeito resiliência do solo e rendimento das culturas melhorados (ROWLEY *et al.*, 2021; YAN *et al.*, 2018, SILESHI *et al.*, 2014; OLDFIELD *et al.*, 2019).

O cálcio possui função estrutural no solo, funciona como agente flocculante o que possibilita agregação das partículas de argila, por isso, reduz a dispersão da argila e a resistência mecânica do solo (DAVIDSON; QUIRK, 1961; AYLMOORE, SILLS, 1982). Segundo Muneer e Oades (1989), a incorporação de gesso (cálcio) e materiais orgânicos no solo aumentou os agregados estáveis e reduziu a dispersão de argilas.

Além disso, a disponibilidade do magnésio para as culturas dependem da textura do solo e da capacidade de troca catiônica (HARIADI; SHABALA, 2004). Sendo assim, o teor de magnésio adequado no solo é primordial para o crescimento e produções vigorosas das culturas (WANG *et al.*, 2020).

4.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

A análise dos resultados deixa claro a associação entre a fração carbono orgânico associado aos minerais, os cátions polivalentes e a produtividade do milho. Desse modo, podemos concluir que a produtividade das culturas nos solos da região norte do Maranhão está relacionada com o aumento nos teores COAM e cátions polivalentes no solo. É evidente que a produtividade é dependente das variáveis citadas, portanto, a aplicação constante de biomassa na superfície do solo, a reciclagem de cátions básicos e estabilização da MOS podem contribuir para a intensificação ecológica da agricultura na região (MOURA, 2021a).

5 CONCLUSÕES

Este estudo revelou que a produtividade do milho variou de 4,41 Mg ha⁻¹ a 12,51 Mg ha⁻¹. Dessa forma, a oportunidade observada para melhorar os pontos mínimos está relacionada ao aumento no teor dos indicadores que se correlacionam positivamente com a produtividade. A fração estável da MOS carbono orgânico associado aos minerais correlacionou positivamente com cálcio, magnésio e cálcio+magnésio. O valor crítico do teor de cálcio+magnésio determinado foi de 41 mmol_c dm⁻³ para conservar o solo com qualidade estrutural boa.

Portanto, os indicadores de fertilidade do solo, no trópico úmido no norte do Maranhão, que correlacionaram com a produtividade do milho foram: o carbono orgânico associado aos minerais, magnésio, cálcio e cálcio+magnésio. Desse modo, os resultados permitem destacar que se forem melhorados os teores de carbono orgânico associado aos minerais e cátions polivalentes nos solos da região norte do Maranhão é possível intensificar a produção das culturas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- AYLMORE, L. A. G.; SILLS, I. D. Characterization of soil structure and stability using modulus of rupture-exchangeable sodium percentage relationships. **Soil Research**, v. 20, n. 3, p. 213-224, 1982.
- CAMARGO de, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **O Solo e a Planta**. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C2/Comp2.htm>>. Acesso em: 3/1/2023
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56. p. 777-783, 1992.
- COTRUFO, M. Francesca *et al.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.
- DANIELLS, Ian G. Hardsetting soils: a review. **Soil research**. v. 50, p. 349-359, 2012.
- DENMEAD, O. T.; SHAW, Robert H. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn 1. **Agronomy journal**, v. 52, n. 5, p. 272-274, 1960.
- DAVIDSON, J. L.; QUIRK, J. P. The influence of dissolved gypsum on pasture establishment on irrigated sodic clays. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 1, p. 100-110, 1961.
- ELLERBROCK, Ruth H.; GERKE, Horst H. Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 5, p. 721-736, 2018.
- FAGERIA, N. K. Sistema de cultivo consorciado. In: FAGERIA, N. K. (Ed.) - **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Embrapa-DPU, Brasília, 1989, p. 185-196.
- FREITAS, Janierk Pereira de *et al.* Análise do uso e ocupação do solo no Assentamento Santo Antônio no município de Cajazeiras-PB. **Geoambiente On-line**, n. 18, p. 01-18, 2012.
- HARIADI, Yuda; SHABALA, Sergey. Screening broad beans (*Vicia faba*) for magnesium deficiency. I. Growth characteristics, visual deficiency symptoms and plant nutritional status. **Functional Plant Biology**, v. 31, n. 5, p. 529-537, 2004.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA-INMET. **Sistema de suporte à decisão agropecuária**. 2020. Disponível em:<http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/climatologia/bhclimatologicomensal/index>. Acesso em: 22 set. 2022.

IWATA, Bruna De Freitas et al. Total and particulate contents and vertical stratification of organic carbon in agroforestry system in Caatinga. **Revista Caatinga**, v. 34, p. 443-451, 2021.

JOHANNES, Alice *et al.* Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?. **Geoderma**, v. 302, p. 14-21, 2017.

KAY, B. D. Soil structure and organic carbon: a review. **Soil processes and the carbon cycle**, p. 169-197, 2018.

KLEIJN, David *et al.* Ecological intensification: bridging the gap between science and practice. **Trends in ecology and evolution**, v. 34, n. 2, p. 154-166, 2019.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. México: Fundo de Cultura Econômica, 1948. 466 p.

LAL, Rattan. Soil organic matter content and crop yield. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 75, n. 2, p. 27A-32A, 2020.

LAL, Rattan. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

LAVALLEE, Jocelyn M.; SOONG, Jennifer L.; COTRUFO, M. Francesca. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261-273, 2020.

LÜTZOW, M. *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. **European journal of soil science**, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.

MENDES, Telmo José et al. Soil carbon stock estimations: methods and a case study of the Maranhão State, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 11, p. 16410-16427, 2021.

MOORE, Tim R.; TURUNEN, Jukka. Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 2, p. 690-696, 2004.

MOURA, Emanuel Gomes de. **Entre a Agricultura e a Ecologia, uma interface por onde transita a emancipação dos agricultores do trópico úmido**. São Luís. THEdesign. 2021a.

MOURA, Emanuel Gomes *et al.* Could more efficient utilization of ecosystem services improve soil quality indicators to allow sustainable intensification of Amazonian family farming?. **Ecological Indicators**, v. 127, p. 107723, 2021b.

MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Aumento da capacidade de enraizamento de um solo tropical estruturalmente frágil usando gesso e resíduos de leguminosas para aumentar o rendimento do milho. **Uso e manejo do solo**. v. 32. p. 118-126, 2016.

MOURA, Emanuel Gomes de *et al.* Avaliação de um sistema de cultivo em aleias em um argissolo franco-arenoso da região amazônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4 p. 1735-1742, 2008.

MOURA, Emanuel Gomes de. **Agroambientes de transição: entre o trópico úmido e o semiárido do Brasil. Atributos; alterações; uso na produção familiar**. São Luís: UEMA, 2004. 20 p.

MUNEER, M.; OADES, J. M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. II. Field studies with ¹⁴C-labeled straw, CaCO₃ and CaSO₄. 2. H₂O. **Soil Research**, v. 27, n. 2, p. 401-409, 1989.

OADES, James M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and soil**, v. 76, n. 1, p. 319-337, 1984.

OLADELE S.O.; ADETUNJI A.T. Agro-residue biochar and N fertilizer addition mitigates CO₂-C emission and stabilized soil organic carbon pools in a rain-fed agricultural cropland. **International Soil and Water Conservation Research**, 2020.

OLDFIELD, Emily E.; BRADFORD, Mark A.; WOOD, Stephen A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. **Soil**, v. 5, n. 1, p. 15-32, 2019.

PRETTY, Jules *et al.* Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 8, p. 441-446, 2018.

PROUT, Jonah M. *et al.* What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 6, p. 2493-2503, 2021.

R Development Core Team. 2009. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Austria. <http://www.R598 project.org>

ROWLEY, Mike C. *et al.* Evidence linking calcium to increased organo-mineral association in soils. **Biogeochemistry**, v. 153, n. 3, p. 223-241, 2021.

ROWLEY, Mike C.; GRAND, Stéphanie; VERRECCHIA, Éric P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1-2, p. 27-49, 2018.

RUBIO, Valentina *et al.* Quantifying soil organic carbon's critical role in cereal productivity losses under annualized crop rotations. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 321, p. 107607, 2021.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., Dos Anjos, L. H. C., De Oliveira, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., CUNHA, T. J. F. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018.

SCHRAG, Daniel P. Preparando-se para capturar carbono. **ciência**, v. 315, n. 5813, pág. 812-813, 2007.

SENA, Virley Gardeny Lima *et al.* Ecosystem services for intensification of agriculture, with emphasis on increased nitrogen ecological use efficiency. **Ecosphere**, v. 11, p. 1-14, 2020.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, Jeffrey E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, v. 164, n. 4, p. 224-234, 1999.

SILESHI, Gudeta Weldesemayat *et al.* Agrossilvicultura: árvores de fertilizantes. **Enciclopédia de sistemas agrícolas e alimentares**, v. 1, p. 222-234, 2014.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., Teixeira, W. G. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2017.

THOMAZ, Edivaldo L.; ANTONELI, Valdemir; DOERR, Stefan H. Effects of fire on the physicochemical properties of soil in a slash-and-burn agriculture. **Catena**, v. 122, p. 209-215, 2014.

TIECHER, Tales. **A química antes da química do solo**. RS : URI – Frederico Westph, 2015.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.

YAN, Bo; HOU, Ying. Effect of soil magnesium on plants: a review. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2018. p. 022168.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p.1467-1476, 1988.

WALTHALL, Charles L. *et al.* **Mudanças climáticas e agricultura nos Estados Unidos: Efeitos e adaptação**. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, Serviços de Pesquisa Agrícola, Escritório do Programa de Mudança Climática, 2013.

WANG, Zheng *et al.* Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis. **Frontiers in plant science**, p. 1727, 2020.

ZIEGLER, Alan D. *et al.* Environmental consequences of the demise in swidden cultivation in montane mainland Southeast Asia: hydrology and geomorphology. **Human Ecology**, v. 37, n. 3, p. 361-373, 2009.

APÊNDICE**Análise granulométrica das duas profundidades do solo**

	Areia (g Kg⁻¹)	Silte (g Kg⁻¹)	Argila (g Kg⁻¹)
0-15 cm	691,30	193,70	115,00
15-30 cm	751,80	83,10	165,10

Fonte: Autora (2022).