



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

EMANUELE HELMANN NUNES

**RELAÇÃO ENTRE CARBONO ORGÂNICO, ATIVIDADE
MICROBIANA E AGREGAÇÃO DE SOLO ARENOSO,
SUBMETIDO A DIFERENTES USOS**

Londrina
2025

EMANUELE HELMANN NUNES

**RELAÇÃO ENTRE CARBONO ORGÂNICO, ATIVIDADE
MICROBIANA E AGREGAÇÃO DE SOLO ARENOSO,
SUBMETIDO A DIFERENTES USOS**

Tese apresentada ao Departamento de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, Área de concentração em Manejo Sustentável do Solo e Engenharia Agrícola, como requisito à obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientador: Professor Dr. João Tavares Filho.

Coorientadora: Professora Dra. Gabriela Machineski da Silva.

Londrina
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

N972r Nunes, Emanuele Helmann.
RELAÇÃO ENTRE CARBONO ORGÂNICO, ATIVIDADE MICROBIANA E AGREGAÇÃO DE SOLO ARENOSO, SUBMETIDO A DIFERENTES USOS / Emanuele Helmann Nunes. - Londrina, 2025.
149 f. : il.

Orientador: João Tavares Filho.
Coorientador: Gabriela Machineski da Silva.
Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2025.
Inclui bibliografia.

1. Manejo do solo - Tese. 2. Indicadores físicos - Tese. 3. Química do solo - Tese. 4. Indicadores microbiológicos - Tese. I. Tavares Filho, João. II. Machineski da Silva, Gabriela. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

EMANUELE HELMANN NUNES

**RELAÇÃO ENTRE CARBONO ORGÂNICO, ATIVIDADE
MICROBIANA E AGREGAÇÃO DE SOLO ARENOSO,
SUBMETIDO A DIFERENTES USOS**

Tese apresentada ao Departamento de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, Área de concentração em Manejo Sustentável do Solo e Engenharia Agrícola, como requisito à obtenção do título de Doutora em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Gabriela Machineski da Silva
Coorientadora
Presidente da banca
Universidade Estadual de Londrina

Dra. Alini Taichi da Silva Machado
Banca examinadora
IDR – Paraná

Dra. Francieli de Fátima Missio
Banca examinadora
Universidade Estadual de Londrina

Dr. Luiz Henrique Campos de Almeida
Banca examinadora
Universidade Estadual de Londrina

Dr. André Luiz Martinez de Oliveira
Banca examinadora
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 21 de fevereiro de 2025.

DEDICATÓRIA

Dedico à Deus, por me abençoar e me sustentar nos momentos difíceis.

Aos meus amados pais, Elaor (*in memoriam*) e Angela, pelo amor e apoio que sempre dedicaram a mim, e pelo incentivo aos estudos desde pequena.

Ao meu irmão, Fernando, pelo seu apoio e amor.

Ao meu orientador, Dr. João Tavares Filho e minha coorientadora, Dra. Gabriela Machineski da Silva, pelos ensinamentos, compreensão e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de pesquisa e a conclusão desta tese de doutorado foram possíveis graças ao apoio e contribuição de inúmeras pessoas e instituições.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que desempenharam um papel significativo nesta jornada acadêmica:

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelo amparo nos momentos difíceis e pela oportunidade de estudar e contribuir com a pesquisa científica.

Agradeço ao meu orientador, João Tavares Filho, pela orientação durante a pesquisa, sua dedicação, paciência e insights valiosos, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, a sua orientação inspiradora e mentoria foram inestimáveis para o meu crescimento como pesquisador.

Agradeço a minha coorientadora, Gabriela Machineski da Silva, pela sua orientação e apoio ao durante a pesquisa, sem a sua ajuda, dedicação e sabedoria, este trabalho não teria sido possível.

Dia 29/11/2024, data inicial da minha defesa e o dia que carrega a triste notícia do desencarne do meu pai, quero levar para sempre em meu coração a sua ligação na noite anterior me desejando uma boa apresentação e a sua felicidade que eu estava terminando o doutorado e iria retornar ao MT.

Agradeço a minha família, em especial, aos meus pais, Elaor Amaro Nunes (*in memoriam*) e Maria Angela Helmann Nunes, que sempre me incentivaram nos estudos, por todo apoio, paciência e dedicação nesses anos de pesquisa e estudos intensos, bem como, pelos exemplos de caráter e persistência. E ao meu irmão, Fernando Helmann Nunes, pelo seu apoio e incentivo.

Agradeço ao meu amigo, João Carlos Gonçalves, que compartilhou esse sonho comigo. Em 2021, iniciamos juntos nossa trajetória no doutorado na UEL e, com dedicação e determinação, conseguimos concluir com êxito nossa pesquisa. Essa conquista é um testemunho da nossa colaboração e do compromisso com os estudos.

Agradeço ao meu amigo Márcio Rogério de Oliveira, pelo apoio nas coletas de solo em campo, pela ajuda nos artigos e com as amostras de solo e por seu incentivo.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante essa jornada, em especial a Stephanie dos Santos Locatelli, pelo apoio a pesquisa, estudos, cafés e troca de experiências.

Agradeço aos membros da banca examinadora, pelo tempo dedicado à leitura,

análise criteriosa e valiosas sugestões que ajudaram a aprimorar esta tese. Suas contribuições e críticas construtivas foram fundamentais para a qualidade final deste trabalho.

Sou grata aos colegas de laboratório, aos demais membros do grupo de pesquisa e a todos aqueles com quem compartilhei conhecimentos e discussões estimulantes. Agradeço aos estagiários, Brenda, Ellen, Dafne e Lucas, pelo empenho e ajuda durante a pesquisa e análises no laboratório de solos.

Agradeço à UEL – Universidade Estadual de Londrina, por fornecer os recursos necessários para a realização desta pesquisa. O financiamento e as oportunidades concedidas foram de vital importância para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por acreditar na ciência, pelo incentivo à pesquisa e pela concessão da bolsa de doutorado.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para essa pesquisa e tese.

NUNES, Emanuele Helmann. **Relação entre carbono orgânico, atividade microbiana e agregação de um solo arenoso, submetido a diferentes usos**. 150f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR, 2025.

RESUMO

O uso e manejo intensivo do solo em sistemas agropecuários podem alterar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, impactando negativamente sua qualidade. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência do uso do solo e sua relação com o carbono orgânico total nos atributos físicos, químicos e biológicos de um solo arenoso. Para atingir esse objetivo geral, o trabalho teve como objetivos específicos, avaliar a influência dos usos do solo de lavoura, pastagem e floresta na qualidade física e identificar como os usos influenciam na qualidade química e na qualidade biológica de um solo arenoso. O estudo foi conduzido no município de Rio Branco do Ivaí, Paraná, em uma área de estudo que incluiu três tipos de uso do solo, lavoura, pastagem e floresta. As amostras de solo foram coletadas em duas profundidades (0-10 cm e 10-20 cm) para análise dos atributos físicos (porosidade total, macro e micro porosidade, densidade do solo, argila dispersa em água, índice de dispersão, índice de floculação, diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados), químicos (pH, P, K⁺, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, CTC efetiva e potencial, m%, SB, V%, matéria orgânica e carbono orgânico total) e biológicos (carbono da biomassa microbiana, nitrogênio da biomassa microbiana, quociente metabólico e respiração basal do solo). O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado entre as três áreas, com cinco repetições cada, os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA e comparados pelo teste Tukey (5%), análise de componentes principais e correlação de Pearson entre as variáveis para cada uso do solo. A macroporosidade na profundidade de 10-20 cm foi menor na pastagem e lavoura, a microporosidade foi menor na lavoura, nas duas profundidades, e a porosidade total foi maior na pastagem e floresta, nas duas profundidades. A densidade do solo foi maior na lavoura na profundidade de 0-10 cm, e maior na lavoura e pastagem na profundidade de 10-20 cm, indicando compactação na lavoura e pastagem. O índice de estabilidade de agregados foi maior na floresta e pastagem na profundidade de 10-20 cm, indicando que a lavoura apresenta uma maior susceptibilidade à erosão e degradação do solo. O solo de floresta apresentou uma boa relação entre macro e microporos, menor densidade do solo e maior estabilidade de agregados, apresentando boa agregação e estabilidade do solo. O pH indicou um solo ácido para os tratamentos analisados. A lavoura apresentou teores menores de CTC, SB, V%, Ca, Mg, matéria orgânica e carbono orgânico total, refletindo degradação química. A floresta e pastagem apresentaram maiores valores de nitrogênio na biomassa microbiana e menores valores de quociente metabólico, refletidos pela biomassa microbiana mais rica e ativa, e evidenciando que o uso da pastagem consegue manter os níveis de carbono orgânico total. Os solos sob floresta apresentaram maiores valores de respiração basal do solo, indicando maior atividade. A matéria orgânica e o carbono orgânico total apresentaram maiores correlações positivas na floresta em relação a agregação, na floresta e lavoura em relação aos atributos químicos, e na floresta em relação a atividade microbiana. Os níveis de carbono orgânico total foram menores na lavoura do que na pastagem. Conclui-se que o uso do solo impacta nos atributos físicos, químicos e biológicos e suas correlações, com indícios de menor qualidade e potencial de degradação na área de lavoura.

Palavras-chave: matéria orgânica, manejo do solo, indicadores físicos, química do solo, indicadores microbiológicos.

NUNES, Emanuele Helmann. **Relationship between organic carbon, microbial activity and aggregation of sandy soil, subjected to different uses.** 150f. Thesis (Ph.D. degree in Agronomy) – State University of Londrina, Londrina-PR, 2025.

ABSTRACT

The conversion of native vegetation to agricultural practices alters the physical, chemical and biological attributes of the soil, negatively impacting its quality. This study aimed to evaluate the influence of land use and its relationship with total organic carbon on the physical, chemical and biological attributes of a sandy soil. To achieve this general objective, the work had as specific objectives, to evaluate the influence of different land uses on its physical quality and to identify how crop, pasture and forest uses influence the chemical and biological quality of a sandy soil. The study was conducted in the municipality of Rio Branco do Ivaí, Paraná, in a study area that included three types of land use, crops, pasture and forest. Soil samples were collected at two depths (0-10 cm and 10-20 cm) for analysis of physical attributes (total porosity, macro and micro porosity, soil bulk density, water-dispersed clay, dispersion index, flocculation index, weighted mean diameter, geometric mean diameter and aggregate stability index), chemical attributes (pH, P, K⁺, Al³⁺, Ca⁺², Mg⁺², H+Al, effective and potential CEC, m%, SB, V%, organic matter and total organic carbon) and biological attributes (microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, metabolic quotient and basal soil respiration). The experiment was carried out using a completely randomized design among the three areas, with five replicates each. The data were subjected to analysis of variance and compared by the Tukey test (5%), principal component analysis and Pearson correlation between the variables for each land use. Macroporosity at the 10-20 cm depth was lower in pasture and cropland, microporosity was lower in cropland at both depths, and total porosity was higher in pasture and forest at both depths. Soil bulk density was higher in cropland at the 0-10 cm depth, and higher in cropland and pasture at the 10-20 cm depth, indicating compaction in cropland and pasture. The aggregate stability index was higher in forest and pasture at 10-20 cm depth, indicating that cropland presents a greater susceptibility to erosion and soil degradation. The forest soil presented a good relationship between macro and micropores, lower soil bulk density and greater aggregate stability, showing good aggregation and soil stability. The pH indicated an acidic soil for the analyzed treatments. Cropland presented lower contents of CTC, SB, V%, Ca, Mg, organic matter and total organic carbon, reflecting chemical degradation. The forest and pasture presented higher nitrogen values in the microbial biomass and lower metabolic quotient values, reflected by the richer and more active microbial biomass, and showing that the use of pasture can maintain the levels of total organic carbon. The soil under forest presented higher values of basal soil respiration, indicating greater activity. Organic matter and total organic carbon presented greater positive correlations in the forest in relation to aggregation, in the forest and cropland in relation to chemical attributes, and in the forest in relation to microbial activity. The levels of total organic carbon decreased when the forest was converted to cropland, while pastures were able to maintain the levels of total organic carbon. Thus, it is highlighted that in the conversion of the forest into agricultural systems, the use of the soil influences the relationship between organic carbon, microbial activity and aggregation. It is concluded that land use impacts physical, chemical and biological attributes and their correlations, with signs of lower quality and potential degradation in the crop area.

Keywords: organic matter, soil management, physical indicators, soil chemistry, microbiological indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de Rio Branco do Ivaí, em relação a América do Sul (a), em relação ao Brasil (b), em relação ao Estado do Paraná (c) e relação dos municípios que fazem divisa (d).	33
Figura 2. Mapa de Classificação Climática Koppen-Geiger (a) e mapa de temperatura média anual do estado do Paraná (b), com destaque a Rio Branco do Ivaí	34
Figura 3. Distância entre as áreas de floresta, pastagem e lavoura.	35
Figura 4. Tamanho das áreas da floresta, pastagem e lavoura.	36
Figura 5. Pontos de coleta das amostras de solo nos usos de floresta, pastagem e lavoura.	38
Figura 6. Solo na área de floresta.	39
Figura 7. Solo na área de pastagem.	39
Figura 8. Solo na área de lavoura.	40
Figura 9. Mapa topográfico dos usos de floresta, pastagem e lavoura.	41
Figura 10. Mapa topográfico e perfil de elevação da área de floresta.	42
Figura 11. Mapa topográfico e perfil de elevação da área de pastagem.	43
Figura 12. Mapa topográfico e perfil de elevação da área de lavoura.	44
Figura 13. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos físicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm.	83
Figura 14. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos físicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 10-20 cm.	84
Figura 15. Correlação de Pearson dos atributos físicos do solo para a floresta.	86
Figura 16. Correlação de Pearson dos atributos físicos do solo para a pastagem. ..	87
Figura 17. Correlação de Pearson dos atributos físicos do solo para a lavoura.	89
Figura 18. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos químicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm.	106
Figura 19. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos químicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 10-20 cm.	108
Figura 20. Correlação de Pearson dos atributos químicos do solo para a floresta.	110
Figura 21. Correlação de Pearson dos atributos químicos do solo para a pastagem.	111

Figura 22. Correlação de Pearson dos atributos químicos do solo para a lavoura.	112
Figura 23. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos biológicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm.	127
Figura 24. Correlação de Pearson dos atributos biológicos do solo para a floresta.	129
Figura 25. Correlação de Pearson dos atributos biológicos do solo para a pastagem.	130
Figura 26. Correlação de Pearson dos atributos biológicos do solo para a lavoura.	131

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Granulometria do solo para os usos de floresta, pastagem e lavoura nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. 69
- Tabela 2. Valores do pH, argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão (ID) e índice de floculação (IF), para os usos de floresta, pastagem e lavoura nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. 70
- Tabela 3. Teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. 73
- Tabela 4. Valores da macroporosidade (macro), microporosidade (micro), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 m. 74
- Tabela 5. Valores do diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. 79
- Tabela 6. Teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. 101
- Tabela 7. Caracterização química para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e de 10-20 cm. 103
- Tabela 8. Teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. 123
- Tabela 9. Indicadores da qualidade biológica do solo para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm. 124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
Al	Alumínio
C	Carbono
Ca	Cálcio
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
CBM	Carbono da Biomassa Microbiana
Cm	Centímetros
Cm ³	Centímetros cúbicos
CO	Carbono orgânico
CO ₂	Dióxido de carbono
COT	Carbono orgânico total
CTC	Capacidade de troca de catiônica
CV	Coeficiente de variação
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DMG	Diâmetro médio geométrico
DMP	Diâmetro médio ponderado
Ds	Densidade do solo
Fe	Ferro
g	Gramas
GEE	Gases de efeito estufa
H	Hidrogênio
H+Al	Acidez potencial
IEA	Índice de estabilidade de agregados
K	Potássio
KCl	Cloreto de potássio
Kg	Quilograma
M	Metros
m	Saturação de alumínio
Mg	Magnésio
Mg	Miligrama

mm	Milímetros
MO	Matéria orgânica
N	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBM	Nitrogênio da Biomassa Microbiana
P	Fósforo
pH	potencial hidrogeniônico
PT	Porosidade total
qCO ₂	Quociente metabólico
RBS	Respiração Basal do solo
SB	Soma de bases
TFSA	Terra fina seca ao ar
V%	Saturação de bases

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	SOLOS ARENOSOS	20
2.2	PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS DE MANEJO	21
2.3	ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS ARENOSOS.....	23
2.4	ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS ARENOSOS.....	25
2.5	MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO ORGÂNICO EM SOLOS ARENOSOS.....	27
2.6	ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DE SOLOS ARENOSOS.....	29
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA AMOSTRADA	33
3.2	COLETAS DO SOLO.....	37
3.3	PERFIL DO SOLO.....	38
3.4	DECLIVIDADE.....	40
3.5	DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS	45
3.5.1	DETERMINAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO ORGÂNICO TOTAL	45
3.6	DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS	46
3.6.1	GRANULOMETRIA DO SOLO.....	46
3.6.2	POROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO.....	47
3.6.3	ESTABILIDADE DE AGREGADOS	47
3.6.4	ARGILA DISPERSA EM ÁGUA.....	48
3.7	DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS BIOLÓGICOS	49

3.7.1	DETERMINAÇÃO DO CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA E NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA	49
3.7.2	RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO	50
3.7.3	QUOCIENTE METABÓLICO.....	51
3.8	ESTATÍSTICA.....	52
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
5	CAPÍTULO 1 - ARTIGO A: INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO ARENOSO	65
5.1	RESUMO	65
5.2	ABSTRACT.....	66
5.3	INTRODUÇÃO	67
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	68
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.6	CONCLUSÃO.....	90
5.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
6	CAPÍTULO 2 - ARTIGO B: IMPACTOS DO USO DO SOLO NA FERTILIDADE DE UM SOLO ARENOSO	97
6.1	RESUMO	97
6.2	ABSTRACT.....	98
6.3	INTRODUÇÃO	99
6.4	MATERIAL E MÉTODOS	100
6.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
6.6	CONCLUSÕES.....	113

6.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
7	CAPÍTULO 3 - ARTIGO C: RELAÇÃO DO USO DO SOLO E ATIVIDADE MICROBIANA DE UM SOLO ARENOSO	119
7.1	RESUMO	119
7.2	ABSTRACT.....	120
7.3	INTRODUÇÃO	121
7.4	MATERIAL E MÉTODOS	122
7.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	122
7.6	CONCLUSÕES.....	133
7.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
8	DISCUSSÃO GERAL	138
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	144
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios enfrentados pelas futuras gerações está relacionado ao aumento da demanda por produção agrícola, devido ao crescimento populacional global estimado em 10,3 bilhões de pessoas até o ano de 2080 (ONU, 2024). Nesse contexto, os solos desempenham um papel determinante, uma vez que são um recurso indispensável no processo produtivo. Os ambientes de produção agrícola são produtos da transformação dos ambientes naturais (Almeida et al., 2016).

A degradação física da estrutura e agregação do solo, causa além de baixa fertilidade natural, uma maior suscetibilidade à erosão, e tendem a apresentar uma elevada taxa de decomposição da matéria orgânica reduzindo o carbono orgânico (Lal, 2001). Isso resulta em perda de carbono do solo para a atmosfera, causando o efeito estufa (Bhattacharyya et al., 2021).

A saúde do solo, a qual refere-se à capacidade persistente do solo de atuar como um ecossistema vivo, sustentando a sobrevivência e o desenvolvimento de plantas, animais e seres humanos, é influenciada pela sustentabilidade agrícola, que pode promover o aumento da produção de alimentos de maneira viável ambientalmente (Karlen et al., 2021).

Os solos arenosos, embora sejam normalmente considerados como solos mais frágeis (Koven et al., 2017), estão ganhando espaço na produção devido à expansão agrícola. Com isso, surge o desafio de melhorar seu manejo com o uso de práticas conservacionistas que visem proteger a sua qualidade física, química e biológica.

Nesse sentido, o uso do solo de maneira sustentável visa contribuir para a mitigação da diminuição da qualidade do solo. A avaliação física do solo que envolve o estudo de sua estrutura, textura, porosidade e capacidade de retenção de água é fundamental. Solos compactados, resultado de práticas agrícolas intensivas como lavoura e pastagem, apresentam menor porosidade e baixa capacidade de infiltração de água, comprometendo o desenvolvimento radicular das plantas. Estudos demonstram que a compactação do solo também pode afetar a fertilidade, pois diminui a disponibilidade das bases trocáveis, que estarão mais fortemente ligadas às argilas, elevando os custos de produção (Hamza; Anderson, 2005; Yingzhi et al., 2004).

Além disso, a avaliação dos atributos químicos do solo também deve ser considerada, pois os atributos químicos influenciam diretamente a capacidade do solo

de sustentar a produtividade das áreas agrícolas. A análise desses parâmetros ajuda a identificar deficiências ou excessos de nutrientes, permitindo a correção adequada por meio de práticas de manejo, como a aplicação de fertilizantes, a calagem, e o uso de matéria orgânica para melhorar a fertilidade do solo (Diacono; Montemurro, 2010).

Também deve ser avaliado os indicadores biológicos do solo, os quais envolvem o estudo da atividade microbiana e da biomassa microbiana, que são indicadores críticos da saúde do solo. A atividade microbiana desempenha um papel vital na decomposição da matéria orgânica e no ciclo de nutrientes no solo. Práticas agrícolas que preservam ou aumentam a biomassa microbiana são essenciais para manter a saúde do solo (Elfstrand et al., 2007; Ren et al., 2019).

Em áreas tropicais e subtropicais, onde a decomposição da matéria orgânica é mais rápida, o manejo correto do solo tem grande influência no carbono orgânico total, sendo a sua manutenção fundamental para a sustentabilidade dos sistemas. Diante disso, têm-se como hipótese que o uso do solo leva a alterações na relação entre o carbono orgânico total e os atributos físicos, químicos e biológicos. Muitos estudos abordam o acúmulo de matéria orgânica relacionado ao manejo do solo, porém, existem poucos estudos que relacionam a influência do uso do solo na qualidade física, química e microbiológica do solo. Portanto, objetivou-se avaliar a influência do uso do solo e sua relação com o carbono orgânico total nos atributos físicos, químicos e biológicos de um solo arenoso.

A tese é apresentada na forma de artigos científicos, a saber:

- Artigo A: Influência do uso do solo nos atributos físicos de um solo arenoso.
- Artigo B: Impactos do uso do solo na fertilidade de um solo arenoso.
- Artigo C: Relação do uso do solo e atividade microbiana de um solo arenoso.

Antecedendo a apresentação dos referidos artigos encontra-se a revisão de literatura e material e métodos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOLOS ARENOSOS

De acordo com Baranoski et al. (2014) para um solo ser classificado como solo arenoso, ele deve apresentar em sua composição menos de 15 g kg^{-1} de argila e considerando seus atributos físicos, geralmente apresentam aptidão agrícola restrita. Os solos arenosos representam aproximadamente 8% do território brasileiro (Donagemma et al., 2016).

Os solos de textura arenosa estão sendo cada vez mais utilizados para a agricultura, impulsionados pela alta demanda de produção. No entanto, os solos arenosos, que são considerados solos mais frágeis, trazem desafios em relação ao manejo, devido à sua maior fragilidade e dificuldades na retenção de carbono orgânico, o que pode resultar em perda de carbono para a atmosfera (Koven et al., 2017), devido à baixa fertilidade natural, bem como, são mais susceptíveis à erosão (Donagemma et al., 2016).

Os processos erosivos estão relacionados ao manejo e uso do solo, refletindo na produtividade e na qualidade ambiental, principalmente pela perda de solo e água pelo escoamento superficial. Os solos arenosos tendem a apresentar baixo teor de matéria orgânica do solo e deficiência em fósforo, baixa capacidade de retenção de água e baixa adsorção de íons (Brady; Weil, 2009).

Donagemma et al. (2016) ressaltam que solos arenosos são mais propensos à degradação e à perda da capacidade produtiva quando comparados aos solos argilosos, ressaltando a importância da textura para definição do manejo exercido sobre o solo. Portanto, o estudo das características que influenciam na erosão, principalmente em solos de textura arenosa, é essencial, pois o processo erosivo do solo é um dos maiores problemas ambientais, ocasionando perdas de solo do horizonte superficial e de nutrientes, também sendo associado ao assoreamento e poluição de corpos hídricos (Wang et al., 2017).

Pesquisas que relacionem a textura arenosa com a caracterização física, química e biológica de solos são importantes para a produção agrícola e para a promoção da conservação do solo. Tais estudos são fonte de informações básicas para trabalhos futuros relacionados à agronomia, hidrologia, ecologia e problemas ambientais (Reichert et al., 2020). Desta forma, destaca-se que devem ser aplicadas

formas de manejo mais conservadoras para solos arenosos, visando a manutenção da capacidade produtiva e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2.2 PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS DE MANEJO

A agropecuária brasileira enfrenta um de seus maiores desafios, a degradação dos solos devido às práticas inadequadas de manejo do solo (Barros et al., 2018). Paralelamente, o crescimento populacional, a demanda por alimentos e a exploração dos recursos naturais reduzem a capacidade do solo em manter o seu ecossistema natural (Nascimento et al., 2019). Aproximadamente, 95% da produção mundial de alimentos tem sua dependência no solo, o que ressalta a necessidade de práticas agrícolas sustentáveis (FAO, 2022).

Uma das práticas sustentáveis indicadas consiste na manutenção da matéria orgânica do solo, que contribuem significativamente para a melhora da estrutura e atividade microbiana do solo. De acordo com Franco et al. (2020), a presença da matéria orgânica no solo desempenha um papel essencial na estrutura e agregação, bem como, contribui para os processos de estabilização e armazenamento de carbono no solo. A interação da matéria orgânica é diretamente influenciada pela entrada de material orgânico, as saídas de carbono do sistema e os diversos processos de decomposição, mineralização, estabilização e respiração microbiana (Cherubin et al., 2023).

O acréscimo de palhada no solo é uma alternativa que contribui para a manutenção da matéria orgânica do solo. Entre as estratégias de manejo para aumento de palhada a consorciação de espécies é uma opção. Inúmeras pesquisas ratificam a utilização do cultivo consorciado do milho com forrageiras tropicais, em especial com espécies do gênero *Brachiaria* (Borghi et al., 2006).

Desta forma, é possível afirmar que as práticas agrícolas que envolvem sistemas conservacionistas possibilitam a entrada e manutenção de carbono no sistema solo. Diferentemente do que acontece em manejos onde prevalecem práticas que degradam a qualidade ambiental, como desmatamento, queimadas e revolvimento do solo, os quais desencadeiam uma maior oxidação da matéria orgânica e conseqüentemente maior liberação de CO₂ (dióxido de carbono) para a atmosfera (Zaman et al., 2021).

Atualmente, os principais sistemas de produção agrícolas empregados são, monocultivo, sucessão de culturas, rotação de culturas e consórcio. O monocultivo consiste no cultivo de apenas uma cultura agrícola, e quando comparados com os tipos de produção em sistemas agroflorestais, apresentam baixo estoque de carbono no solo, o que compromete a qualidade do solo (Gomes et al., 2021).

A sucessão de culturas é um método agrícola que envolve o cultivo sequencial de duas ou mais plantas, em uma mesma área, ao longo de um ano, sendo a soja e o milho safrinha, comumente escolhidos para esse propósito. De acordo com Bertollo; Levien (2019) o monocultivo e a sucessão de culturas é um fator limitante da produtividade e a adoção desse manejo traz riscos de degradação física, química e biológica do solo. Segundo Piatí (2022), a sucessão de culturas, por exemplo, soja seguida de milho safrinha, pode levar à deterioração das propriedades físicas do solo, reduzindo os teores de carbono orgânico do solo.

A rotação de culturas consiste em alternar o plantio de culturas na mesma área anualmente, o que proporciona a ciclagem de nutrientes do solo, contribuindo com a fertilidade, estrutura e agregação do solo (Rambo et al., 2021). Além do consórcio de milho com braquiária, que se apresenta como uma opção para a estratégia de rotação de culturas, também está sendo implementado o consórcio de gramíneas e leguminosas, aumentando as taxas de matéria orgânica, e corroborando com a estrutura e qualidade do solo (Piatí, 2022).

O sistema de plantio direto é composto por um conjunto de estratégias agrícolas fundamentadas em três princípios, sendo eles, rotação de culturas, cobertura do solo permanente e adoção de revolvimento mínimo do solo (Ward et al., 2018). Os solos manejados em plantio direto apresentam maiores teores de carbono e nitrogênio quando comparados aos manejados em sistema convencional, que passam por diversas operações de preparo do solo, como gradagens e aração (Lovato et al., 2004; Melo et al., 2016).

No sistema convencional, ocorre uma diminuição dos teores de carbono orgânico total e aumento do fluxo de CO₂ para a atmosfera, indicando assim a importância de se eliminar a prática de revolvimento para se recuperar solos com problemas de degradação (Melo et al., 2016). A implementação de práticas de manejo adequadas apresenta potencial para promover a aprimoração dos atributos do solo,

com ênfase na matéria orgânica do solo e na agregação do solo (Rossi et al., 2023).

2.3 ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS ARENOSOS

O manejo do solo tem como finalidade criar condições estruturais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas, tanto na parte aérea quanto nas raízes. Dependendo do manejo exercido sobre o solo, mudanças podem acontecer sobre sua densidade e porosidade, podendo dificultar a infiltração de água e promover processos erosivos (Ibrahim; Aliyu, 2016).

A textura também deve ser levada em consideração para o manejo do solo, pois influencia na adesão e coesão entre as partículas e, assim, exerce influência na resistência do solo, compactação e retenção de água no solo. Conforme o sistema de manejo utilizado, o solo pode passar por várias modificações estruturais, pode-se observar que em sistemas de manejo convencionais, caracterizados pelo revolvimento constante do solo, ocorrem mudanças estruturais físicas no solo, e isso se deve ao fato de que, a camada superficial do solo é revolvida, tornando-o mais suscetível à erosão devido à quebra de agregados do solo ocasionadas pelo preparo do solo (Tavares Filho et al., 2010).

A textura é um indicador físico do solo que relaciona proporções das partículas primárias que influenciam na resistência do solo, dinâmica da água, compactação e agregação (Stefanoski et al., 2013). A agregação do solo impacta os aspectos essenciais do solo, aeração, capacidade de retenção de água, retenção de carbono orgânico, permeabilidade, resistência à erosão e suporte à biodiversidade (Rabot et al., 2018). Entretanto, em sistemas agrícolas sujeitos a práticas intensivas, observa-se uma tendência de fragmentação dos agregados, resultando em uma redução na sua capacidade de oferecer suporte ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Carvalho et al., 2023).

De acordo com Ebeling et al. (2011), a textura é um dos fatores que influencia na retenção do carbono orgânico do solo, bem como, na agregação do solo exercida pela matéria orgânica. Os solos de textura arenosa tendem a resistir menos à compactação do solo e demonstram maior taxa de evaporação de água para a atmosfera (Silva et al., 2022). De acordo com King et al. (2020) quando adicionada matéria orgânica no solo, principalmente em solos arenosos, pode-se reduzir os

impactos de estresse hídrico, em épocas de chuvas escassas, pois essa prática aumenta a capacidade de retenção de água no solo.

É necessário investigar esses aspectos sob diferentes perspectivas, considerando a inter-relação com as funções e serviços ecossistêmicos associados (Simon et al., 2022). A estrutura e agregação do solo são altamente influenciadas pelo manejo (Xiao et al., 2020). As mudanças no uso do solo podem influenciar no armazenamento de carbono orgânico, e o teor desse efeito é estritamente relacionado ao manejo e textura do solo (Qiu et al., 2012).

O teor de argila é um fator de agregação do solo e seu efeito depende da mineralogia. Os minerais de argila 2:1 possuem maior capacidade de formação de agregados com a matéria orgânica do que os 1:1. Além disso, a presença de óxidos de ferro e alumínio aumentam a estabilidade do carbono orgânico do solo através da formação de complexos mineral-matéria orgânica (Chorover et al., 2004).

A estabilização dos microagregados do solo está relacionada com os teores de óxidos de Fe e Al do solo (Duiker et al., 2003; Peng et al., 2015). Já no caso dos macroagregados, prevalece a participação de agentes cimentantes orgânicos (Oades, 1988; Peng et al., 2015), influenciados pelo sistema de manejo e que refletem diretamente na qualidade física desses solos.

De acordo com Wu et al. (2018) a estabilidade dos agregados do solo é afetada pela matéria orgânica, óxidos e mineralogia, sendo que os minerais de argila desempenham um papel mais importante do que a sua quantidade, no que se refere à qualidade estrutural do solo. A análise da estrutura e agregação do solo, combinada com a avaliação dos teores de carbono orgânico, constitui uma abordagem essencial para interpretar o processo de dinâmica da matéria orgânica do solo, pois esses parâmetros são capazes de refletir os efeitos dos processos de manejo do solo (Rossi et al., 2023).

A formação e estabilização dos agregados do solo ocorrem de maneira simultânea devido à interação de processos físicos, químicos e biológicos, esses processos operam por meio de mecanismos distintos, nos quais estão envolvidas substâncias que desempenham papéis cruciais na agregação e estabilização do solo, destacam-se a argila, a sílica coloidal, compostos orgânicos, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Silva; Mielniczuk, 1997).

As gramíneas, em virtude de seu sistema radicular mais denso, em geral acarretam uma melhoria nas propriedades físicas do solo, tais como, aumento da macroporosidade, da agregação e estabilidade dos agregados, da friabilidade do solo e da retenção de água (Paula et al., 1998). Em estudo realizado por Borghi et al. (2006) observou-se que a braquiária obteve boa capacidade de geração de matéria orgânica e melhoria na física do solo.

Sistemas conservacionistas de manejo visam à manutenção da matéria orgânica e integridade dos atributos físicos do solo, enquanto sistemas convencionais que promovem o revolvimento do solo interferem negativamente em atributos como densidade, micro e macroporosidade (Penha Simon et al., 2019).

Estudando sistemas convencionais e conservacionistas de preparo de solo, Penha Simon et al. (2019) observaram elevações na emissão de CO₂ e temperatura do solo nos sistemas convencionais. Os mesmos autores afirmaram que os atributos físicos do solo (densidade, volume total de poros, microporosidade e macroporosidade) denotaram maior qualidade física em área de floresta sem ação antrópica e que os sistemas de preparo de solo interferem negativamente em seus atributos.

Segundo Tavares Filho et al. (2001) à medida que o manejo do solo nos sistemas agrícolas se tornou mais intensivo, também ocorreram modificações estruturais mais acentuadas, envolvendo mudanças na forma, tamanho e estabilidade dos agregados.

2.4 ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS ARENOSOS

A qualidade do solo é fundamental para a sustentabilidade agrícola e a saúde dos ecossistemas. Solos saudáveis são essenciais para a produtividade das culturas, a ciclagem de nutrientes e a manutenção da biodiversidade microbiana, e as práticas de manejo afetam diretamente a fertilidade e a capacidade do solo de sustentar a produção agrícola (Shah; Wu, 2019).

Para avaliar a qualidade química do solo, são analisados vários atributos, entre eles, o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), o teor de matéria orgânica, e os níveis de nutrientes essenciais como fósforo e potássio. Estes parâmetros fornecem uma visão abrangente da fertilidade do solo e da sua capacidade de suportar

o crescimento das plantas, e desses atributos, a matéria orgânica é essencial, pois desempenha um papel crucial em várias funções do solo (Fageria, 2012).

Considerando que a matéria orgânica é um componente essencial da dinâmica de carbono do solo (Cherubin et al., 2023), é necessário compreender o efeito do manejo na agricultura convencional e nas pastagens perenes. O crescimento populacional e o aumento da demanda por alimentos, geram uma pressão para mudanças no uso dos solos, causando alterações nos estoques de carbono orgânico (Ramos et al., 2023). A adição de matéria orgânica ao solo contribui para melhorar a capacidade de absorção de água e de fornecimento de nutrientes para as plantas (Trani et al., 2013).

A matéria orgânica, representada por resíduos animais e vegetais, em estado diverso de decomposição, apresenta teores relativamente baixos nos solos minerais típicos (30 a 50 g kg⁻¹) e tem grande influência nas propriedades do solo e no crescimento e desenvolvimento das plantas (Trani et al., 2013). O manejo pode contribuir para o aumento de matéria orgânica no solo, desempenhando um papel crucial no sequestro de carbono da atmosfera, agindo como sumidouro de carbono e auxiliando na mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, através da adição de matéria orgânica ao solo, ocorre o estímulo para a formação de agregados estáveis, melhorando a estrutura e a qualidade física do solo. As principais funções da matéria orgânica no solo são, fonte de nutrientes para as plantas, alta capacidade de retenção de íons e água e alto poder tampão e de quelação (Brunetto et al., 2012; Vasconcelos et al., 2014).

Na substituição da vegetação nativa para lavouras e pastagens ocorrem alterações significativas na produção de biomassa aérea e radicular, no teor de matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes e no processo de intemperismo natural (Mehnaz et al., 2019). Se o uso e manejo nessas áreas for intensivo, mudanças negativas significativas podem ocorrer. Esses principais problemas são a erosão do solo e a contaminação ambiental, que já são evidentes em várias áreas agrícolas do estado do Paraná (Fronza et al., 2022).

Em regiões tropicais e subtropicais, onde a decomposição da matéria orgânica ocorre rapidamente, o manejo correto do solo é essencial para manter estoques de carbono adequados, garantindo a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Portanto,

nessas regiões é fundamental analisar os processos de ganhos e perdas de carbono orgânico, com o objetivo de assegurar um manejo eficaz e a preservação da qualidade ambiental.

2.5 MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO ORGÂNICO EM SOLOS ARENOSOS

Freitas et al. (2019) observaram que existe uma relação direta entre a textura e a humificação da matéria orgânica do solo. Segundo Castro et al. (2018) geralmente, solos de textura mais argilosa possuem maiores teores de carbono orgânico quando comparados com solos de textura mais arenosa. A textura é um dos fatores que influencia na retenção do carbono orgânico do solo (Ebeling et al., 2011; Dick et al., 2005). Segundo Bernoux et al. (1999), os solos arenosos que possuem uma alta proporção de carbono orgânico do solo associado às partículas de areia, são mais vulneráveis ao manejo, pois essa fração é mais suscetível às perdas por mineralização.

O manejo adotado no solo interfere na quantidade de carbono que é liberada no ambiente, principalmente quando se trata da substituição de vegetação nativa por sistemas agrícolas. Nesse caso, ocorre alteração tanto na quantidade quanto na qualidade do carbono do solo (Costa et al., 2009). Cunha et al. (2007) observaram que os sistemas de manejo implicaram em expressivos efeitos na qualidade dos solos tropicais e subtropicais. A decomposição da matéria orgânica é influenciada pela textura, podendo acarretar o aumento ou diminuição da quantidade de carbono ao longo do perfil do solo.

Em geral, solos de textura arenosa são considerados mais frágeis, principalmente quando se analisam áreas situadas em clima tropical, nas quais observam-se uma maior dificuldade de estabilidade de agregados, elevada taxa de decomposição da matéria orgânica do solo e dificuldade de estocagem de carbono orgânico (Koven et al., 2017).

Ações antrópicas como desmatamento, queima de combustíveis fósseis, queimadas, substituição da cobertura vegetal e mudanças no uso do solo, afetam diretamente a dinâmica e ciclo do carbono, refletindo em profundas alterações ambientais e climáticas (Bayer et al., 2016). Em solos sob vegetação nativa, ocorre um equilíbrio dinâmico da matéria orgânica, no qual as entradas e saídas de carbono

do sistema solo-planta são equivalentes, resultando na manutenção constante do teor de matéria orgânica ao longo do tempo.

Por outro lado, em solos submetidos a manejos intensos, esse equilíbrio é perturbado, levando a modificações no teor de matéria orgânica do solo (Tornquist et al., 2023). A implementação de sistemas de manejo que regularmente incorporem resíduos orgânicos no solo desempenha um papel essencial na manutenção de uma estrutura de solo de qualidade (Tavares Filho; Tessier, 2010). A agregação está relacionada com a permanência da união das partículas do solo e a matéria orgânica é um fator preponderante para essa união (Fernandes et al., 2017). O manejo do solo influencia diretamente nessas características (Tavares Filho et al., 1999) e o aumento do teor de carbono orgânico favorece a agregação do solo (Tavares Filho et al., 2014).

Quando um ambiente natural sofre alteração, na maioria das vezes para implantação de sistemas agrícolas com manejos intensivos, é observada uma redução na quantidade de matéria orgânica do solo (Nanzer, et al., 2019). Por sua vez, ao se comparar solos de um mesmo sistema com formas de manejo diferentes, observa-se uma variação nos indicadores de qualidade desse solo. O plantio direto, prática que visa eliminação das operações de revolvimento do solo, é uma alternativa viável para proporcionar a melhoria da qualidade do solo, garantindo manutenção da produção (Wezel et al., 2014).

Silva et al. (2014), em experimento realizado ao longo de 22 anos com diferentes manejos de solo, observaram que solos manejados sob sistema de plantio direto e plantio direto com escarificação à profundidade de 25 cm a cada três anos apresentaram-se mais porosos e menos compactos quando comparados ao preparado de maneira convencional, e ainda, observaram níveis mais elevados de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo em ambos os sistemas de plantio direto.

Minasny et al. (2017) ressaltam que solos com baixos teores de carbono orgânico podem estar associados à má estrutura, perda do solo e à baixa disponibilidade de nutrientes e produtividade. A perda de carbono orgânico do solo está relacionada aos processos de degradação e manejo do solo, sendo que o processo de perda de carbono orgânico é mais intenso em solos de textura arenosa quando comparados a solos argilosos.

Bhattacharyya et al. (2021) observaram que macroagregados com alta porosidade promovem um maior acúmulo de carbono orgânico no solo e uma maior atividade enzimática microbiana. Os mesmos autores enfatizaram ainda que a perda da porosidade em macroagregados diminui a atividade enzimática em solos cultivados com culturas anuais. Rabbi et al. (2016) explicam que isso acontece porque os agregados do solo afetam as atividades microbianas e biofísicas, protegendo o carbono orgânico do solo.

A variabilidade dos tipos morfológicos de agregados do solo e seu potencial como indicadores de qualidade do solo apontam disparidades significativas nos teores de carbono orgânico total e suas respectivas frações, com especial destaque para as agregações resultantes de atividades biológicas, sobretudo a ação de macrofauna e raízes (Lima et al., 2020).

Baixos níveis de carbono orgânico podem resultar na perda da qualidade estrutural do solo, aumentar a susceptibilidade a processos erosivos e diminuir a capacidade produtiva desses solos (Lal, 2001). Para manter o carbono orgânico no solo são necessárias algumas práticas, como evitar o desmatamento, revolvimento do solo, aração e gradagem contínuas. Isso devido à susceptibilidade e à oxidação microbiana que o carbono possui, principalmente em solos descobertos (Leite et al., 2003; Barreto et al., 2008).

A avaliação da qualidade química do solo visa uma compreensão de um sistema complexo e dinâmico, abrangendo a interpretação dos processos produtivos e a conservação dos recursos naturais. A ausência de uma avaliação prévia do potencial agrícola ao aplicar práticas de manejo do solo pode resultar na degradação dessa qualidade (Silva et al., 2023). No entanto, Centeno et al. (2017) afirma que esta situação está mudando, pois, as pesquisas sobre o manejo de solos arenosos têm melhorado o entendimento nesse sistema de produção e, como resultado, a degradação tende a diminuir.

2.6 ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DE SOLOS ARENOSOS

Os indicadores de qualidade biológica do solo, biomassa microbiana, respiração basal e quociente metabólico, podem ser categorizados como uma fonte de informação sobre o aspecto específico, oferecendo uma representação da

sustentabilidade do ecossistema em questão (Silva et al., 2023). Em busca contínua de aprimorar a compreensão das questões do solo, os cientistas desta área incorporam o conceito de saúde do solo (Brevik et al., 2019), de forma que o manejo aplicado garanta a agregação e estrutura do solo a longo prazo, com viabilidade econômica ao produtor rural (Brevik et al., 2022).

O manejo do solo, incluindo a aplicação de fertilizantes, defensivos agrícolas, resíduos vegetais e plantas de cobertura, influencia significativamente a atividade e a composição das comunidades microbianas (Ramos et al., 2023).

A atividade microbiana desempenha um papel vital na ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica e na formação da estrutura do solo, o que é essencial para a manutenção da fertilidade do solo e para a produtividade das culturas (Demeter, 2018). A microbiologia do solo também afeta a estrutura dos agregados do solo (Zhang et al., 2012), pois a estabilidade de agregados do solo possui importante papel na produção de biomassa, ciclagem de água, nutrientes e armazenamento de carbono orgânico (Rabot et al., 2018).

Alguns dos atributos microbiológicos mais avaliados incluem a diversidade microbiana, o carbono da biomassa microbiana (CBM), o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), a respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico (qCO_2) (Pankhurst et al., 1997).

A atividade microbiana pode variar de acordo com a porosidade (Wang et al., 2017), sendo que essa variação nos agregados reflete a influência da estrutura do solo na biodiversidade (Ruamps et al., 2011; Bach et al., 2018) e com a presença de raízes.

A utilização de gramíneas em áreas degradadas contribui para a melhoria das propriedades edáficas do solo, aumentando também os teores de carbono e condições físicas do solo (Macedo, 2009; Gazolla et al., 2015). Além disso, por apresentarem um sistema radicular agressivo favorecem a manutenção da matéria orgânica do solo, seja pela alta capacidade de exploração do solo ou pela distribuição de exsudatos na área (Carneiro, et al., 2009).

Os indicadores microbiológicos são essenciais para avaliar a qualidade do solo, pois fornecem informações detalhadas sobre a saúde e a funcionalidade do solo. O CBM e NBM indicam a quantidade de carbono e nitrogênio presentes na biomassa

microbiana, refletindo a produtividade microbiana e a capacidade de ciclagem de nutrientes. O qCO_2 mede a eficiência metabólica dos microrganismos, enquanto a respiração microbiana avalia a atividade respiratória geral do solo. Estudos demonstram que a avaliação desses índices pode detectar mudanças na qualidade do solo antes que alterações químicas e físicas sejam observáveis, permitindo uma gestão mais proativa e sustentável (Wang et al., 2021).

A diversidade microbiana é crucial para a estabilidade e resiliência dos ecossistemas do solo. Solos com alta diversidade microbiana são capazes de resistir a estresses ambientais e manter funções ecológicas essenciais, como a decomposição de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (Sharma et al., 2010).

Práticas agrícolas intensivas, como a sucessão de culturas e o uso excessivo de fertilizantes químicos, podem reduzir a diversidade microbiana do solo. Estudos mostram que o cultivo de milho e centeio anual, resultou em uma redução da matéria orgânica do solo e da biomassa microbiana, além de uma diminuição da diversidade funcional microbiana (Nsabimana et al., 2004).

O uso agrícola a longo prazo altera a estrutura da comunidade microbiana. Bissett et al. (2011) comparou solos agrícolas com solos de pastagem e mostrou que, apesar da diversidade bacteriana ser semelhante entre os tratamentos, a estrutura da comunidade microbiana diferia significativamente, com mudanças na composição bacteriana e fúngica.

O uso e manejo intensivo em áreas agrícolas diminui a riqueza e diversidade fúngica, enquanto aumenta a diversidade bacteriana, e isso pode ser atribuído às práticas de preparo do solo, que perturbam a comunidade fúngica e promovem o crescimento de bactérias (Lienhard et al., 2013).

Pastagens manejadas de forma contínua, especialmente com a adição de matéria orgânica, tendem a aumentar a diversidade microbiana do solo, e o manejo de pastagens com resíduos orgânicos aumenta a riqueza e diversidade das comunidades microbianas do solo devido à contínua deposição de nutrientes (Yang et al., 2019). As práticas de manejo sustentável promovem a estabilidade das comunidades microbianas, o que ajuda a mitigar a dispersão de taxas associadas à pastagem para solos de floresta adjacentes (Wu et al., 2021).

O CBM é um indicador direto da quantidade de microrganismos no solo e está

relacionado à capacidade do solo de decompor matéria orgânica e ciclar nutrientes. Solos com altos níveis de CBM geralmente apresentam maior fertilidade e melhor estrutura do solo. Giacometti et al. (2013) mostraram que a adição de matéria orgânica, aumenta significativamente o CBM, melhorando a qualidade do solo.

O NBM indica a quantidade de nitrogênio presente na biomassa microbiana, refletindo a produtividade microbiana e a capacidade de ciclagem de nutrientes do solo. Esse indicador é altamente sensível a mudanças nas práticas de manejo, como rotação de culturas e aplicação de fertilizantes orgânicos, e pode fornecer informações sobre a saúde do solo antes que mudanças significativas nos níveis de matéria orgânica sejam observadas (Fauci; Dick, 1994).

O manejo intensivo empregado na agricultura resulta em uma diminuição significativa dos níveis de CBM e NBM. No estudo de Huang et al. (2008) no nordeste da China, mostrou que a biomassa microbiana carbono e nitrogênio diminuíram após o uso agrícola intensivo.

Práticas de manejo agrícola, como a monocultura e o uso de fertilizantes químicos, afetam negativamente o CBM e NBM (Yadav et al., 2019). Pastagens bem manejadas, especialmente com a adição de matéria orgânica, tendem a aumentar os níveis de CBM e NBM. Isso é evidenciado em estudos que mostram que pastagens manejadas sustentavelmente possuem maior biomassa microbiana em comparação com solos agrícolas (Yang et al., 2019). Jia et al. (2010) demonstraram que as pastagens possuem maiores concentrações de CBM e NBM em comparação com solos agrícolas.

O qCO_2 representa a eficiência metabólica dos microrganismos do solo, e seu alto valor indica que os microrganismos estão usando mais energia para manutenção em vez de crescimento, o que pode ser um sinal de estresse ambiental ou baixa qualidade da matéria orgânica do solo disponível (Anderson, 2003).

A RBS é um dos mais antigos parâmetros para quantificar a atividade microbiana do solo. Alta respiração indica elevada atividade microbiana e rápida decomposição de matéria orgânica, mas também pode sugerir perda de carbono do solo a longo prazo (Parkin et al., 1996). Portanto, é um indicador importante tanto da saúde do solo quanto do seu potencial de perda de carbono.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA AMOSTRADA

A área estudada está localizada no município de Rio Branco do Ivaí, região Norte Central Paranaense, Paraná ($24^{\circ}20'16,139''$ S e $51^{\circ}18'17,957''$ W) (Figura 1), com altitude média de 650 m (IBGE, 2020).

O clima é caracterizado como subtropical úmido Cfa, conforme a classificação de Köppen-Geiger com temperaturas médias de 20°C e precipitação média anual de 1650 mm (Alvares et al., 2013) (Figura 2).

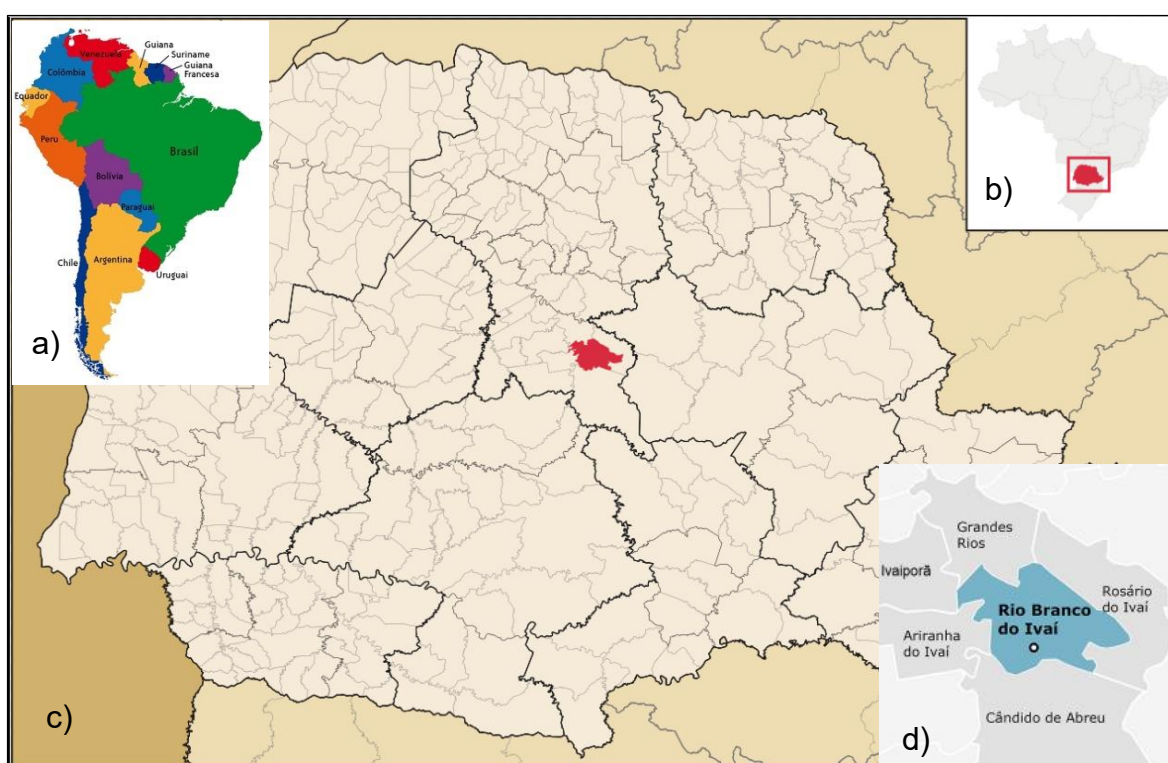


Figura 1. Localização do município de Rio Branco do Ivaí, em relação a América do Sul (a), em relação ao Brasil (b), em relação ao Estado do Paraná (c) e relação dos municípios que fazem divisa (d).

Fonte: adaptado de IPARDES (2024) e Base Cartográfica ITCG (2010).

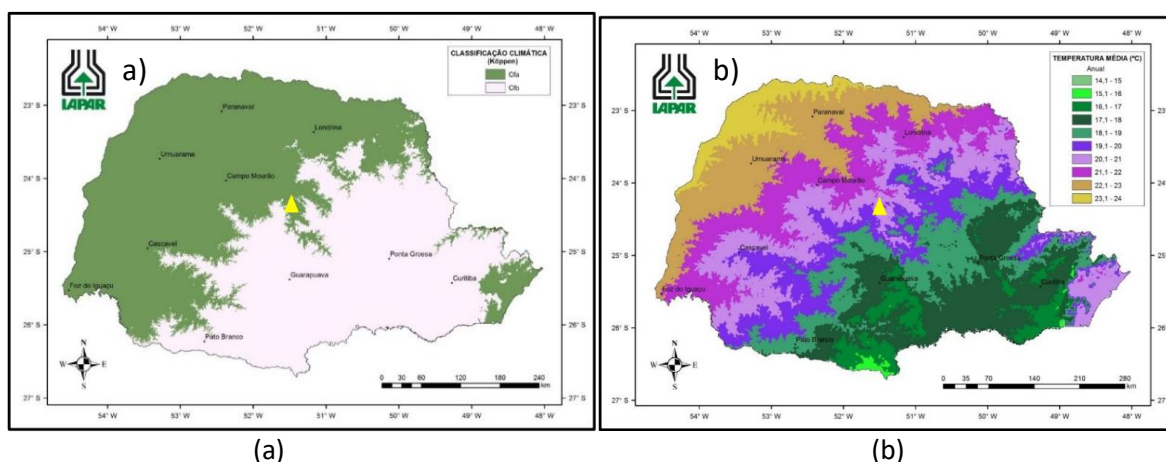


Figura 2. Mapa de Classificação Climática Köppen-Geiger (a) e mapa de temperatura média anual do estado do Paraná (b), com destaque a Rio Branco do Ivaí
Fonte: Adaptado de Nitsche et al. (2019).

A evolução temporal do uso do solo da área estudada, originalmente consistia em floresta nativa e posteriormente foi convertida para agricultura e depois uma parte foi transformada em pastagem.

As áreas selecionadas para este estudo foram: a) lavoura: culturas agrícolas temporárias com mais de 10 anos de plantio direto e sem rotação de culturas; b) pastagem extensiva, com mais de 10 anos de pastejo e sem reforma; e c) floresta nativa (figura 3).

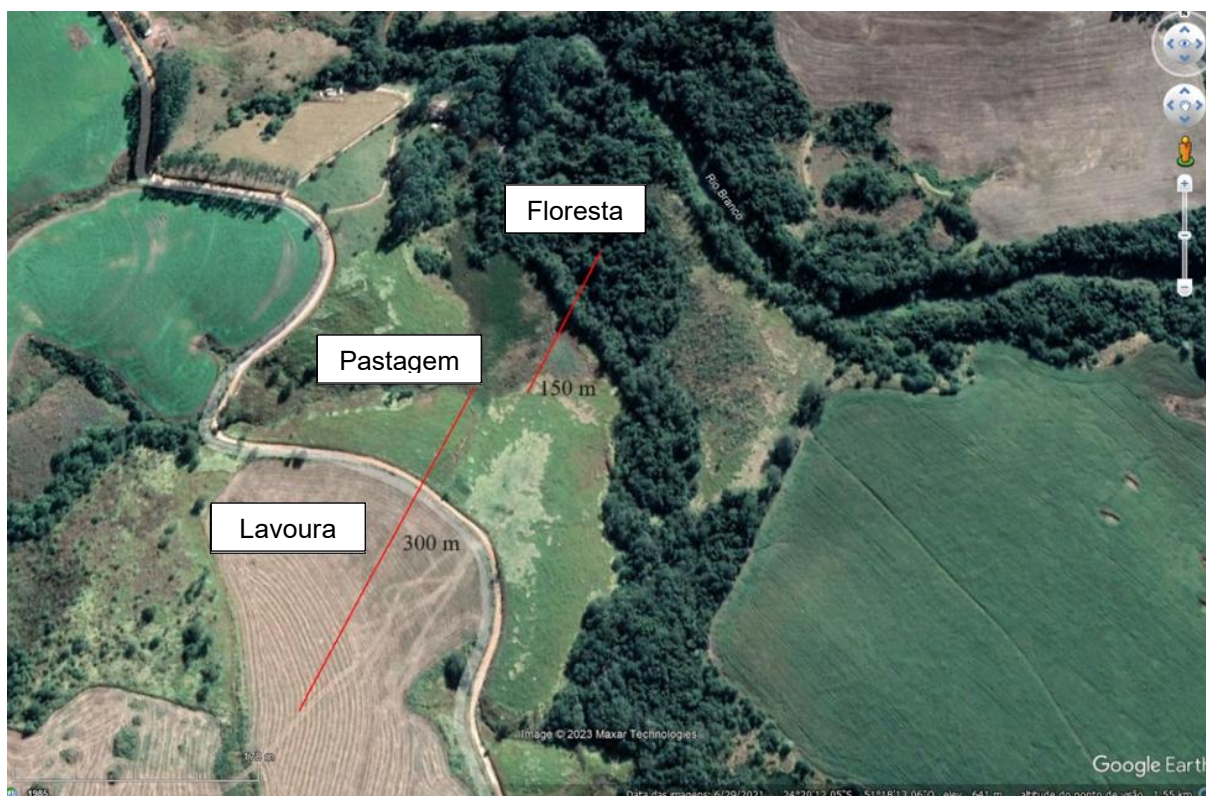


Figura 3. Distância entre as áreas de floresta, pastagem e lavoura.

A área de estudo é em topossequência, conforme observado na figura 3, pode-se ressaltar que a distância entre as áreas de lavoura e pastagem corresponde a 300 metros, divididas por uma estrada rural não pavimentada, e a distância entre pastagem e floresta é de 150 metros.

Inicialmente, uma parte da área de floresta nativa foi desmatada e utilizada para o cultivo de arroz, feijão, milho e algodão, ao longo das décadas de 1970 a 1990. Na década de 1990, a área foi convertida em pastagem para bovinocultura de corte e leiteira, utilizando as espécies *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha cv. Marandu*, em um sistema extensivo, até aproximadamente o ano de 2010.

A partir do ano de 2010, uma parte da área (a área denominada lavoura na figura 3) passou a ser utilizada para atividades agrícolas, com plantio de soja com sucessão de milho, trigo ou aveia. Sendo, soja e milho; ou soja e trigo; ou soja e aveia, de forma alternada e aleatória, levando em consideração o tempo de colheita da soja para plantio do milho e o preço de venda do trigo e aveia. Sendo na maioria dos casos, soja e milho.

No entanto, a partir de 2014, o plantio de trigo foi descontinuado devido a

questões de viabilidade econômica. A área permanece destinada à agricultura, com o plantio de soja e sucessão de milho ou aveia, e a escolha entre essas duas culturas é determinada pelo tempo de colheita da soja, sendo o milho preferido quando a colheita ocorre no momento apropriado e a aveia quando há atrasos na colheita. Em novembro de 2022, realizou-se o plantio de soja na área.

A vegetação da área de floresta é caracterizada como Floresta Estacional Semidecidual, e está sob o Bioma Mata Atlântica. A Lei Federal nº 11.428/2006 que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, estabelece que a utilização desse bioma tem por objetivo geral o desenvolvimento sustentável e, por objetivos específicos, a salvaguarda da biodiversidade, da saúde humana, dos valores paisagísticos, estéticos e turismo, do regime híbrido e da estabilidade social.

A área de floresta apresenta características de floresta primária e está localizada em uma Área de Preservação Permanente (APP) adjacente o Rio Branco, o que de acordo com o Novo Código Florestal a mata ciliar deve ter largura mínima de 30 m, porém em alguns pontos a largura da mata ciliar é menor do que a exigida.

A figura 4 apresenta o tamanho das áreas de lavoura, pastagem e floresta.

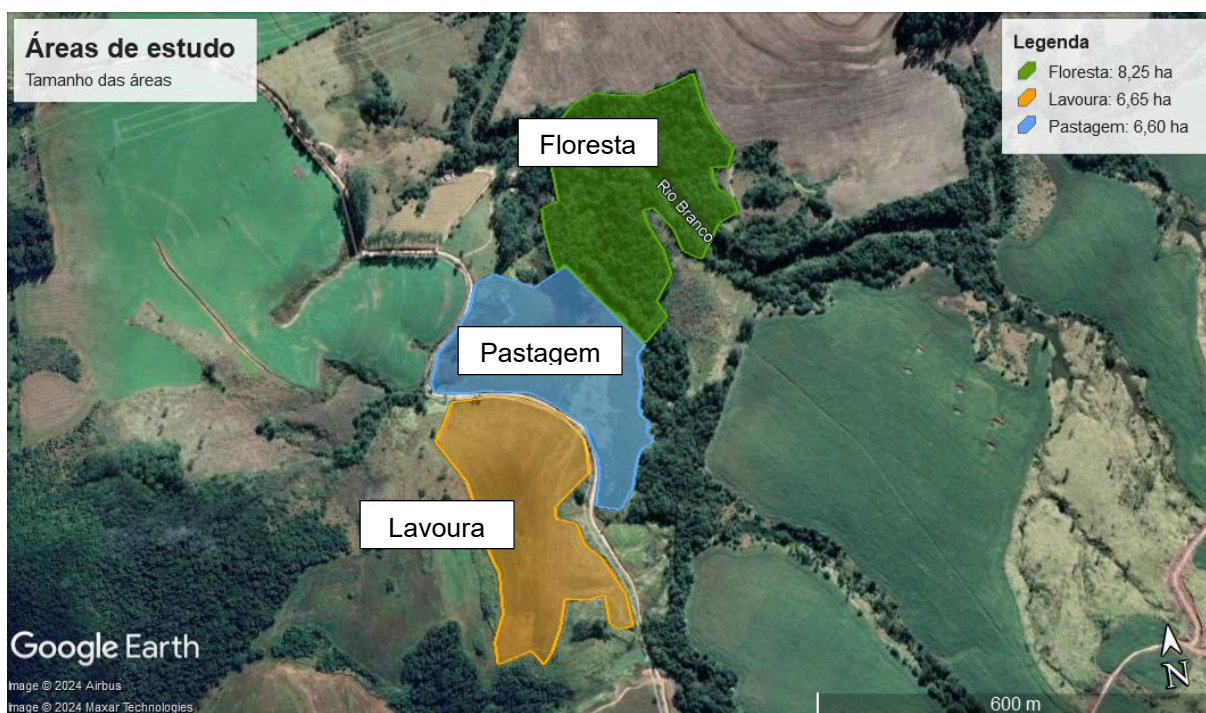


Figura 4. Tamanho das áreas da floresta, pastagem e lavoura.

Fonte: Google Earth, 2023.

De acordo com a figura 4, observa-se que a lavoura possui uma área de 6,65 ha, a pastagem contempla 6,60 ha e a floresta 8,25 ha.

3.2 COLETAS DO SOLO

As coletas do solo foram realizadas conforme o Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos (Embrapa, 2017). Foram coletadas amostras de solos deformadas e indeformadas. As amostras indeformadas foram coletadas com a utilização de anéis volumétricos e bandejas, as amostras deformadas foram coletadas com a utilização de trado e baldes, as quais foram acomodadas em sacos plásticos e identificadas para posterior análise no laboratório de Solos da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

Foram selecionados 5 pontos georreferenciados de coleta em cada área nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, conforme pode ser observado na figura 5. Para a escolha dos pontos amostrados, adotou-se um ponto central na área e quatro pontos nas extremidades ao norte, sul, leste e oeste, buscando manter uma distância similar entre os pontos coletados. Em cada ponto de coleta foram retiradas três amostras deformadas aleatórias para formar uma amostra composta para as análises químicas. As coletas de solo ocorreram no mês de maio de 2023.



Figura 5. Pontos de coleta das amostras de solo nos usos de floresta, pastagem e lavoura.

3.3 PERFIL DO SOLO

Foram realizadas a análise do perfil solo até a profundidade de 90 cm, com o auxílio de trado e calha.

O ponto da área de floresta, com as coordenadas $24^{\circ} 20' 10,671''$ S e $51^{\circ} 18' 12,699$ W, altitude de 640 m pode ser observado na Figura 6.



Figura 6. Solo na área de floresta.

O ponto da área de pastagem, com as coordenadas $24^{\circ} 20' 14,178''$ S e $51^{\circ} 18' 16,483$ W, altitude de 644 m pode ser observado na Figura 7.

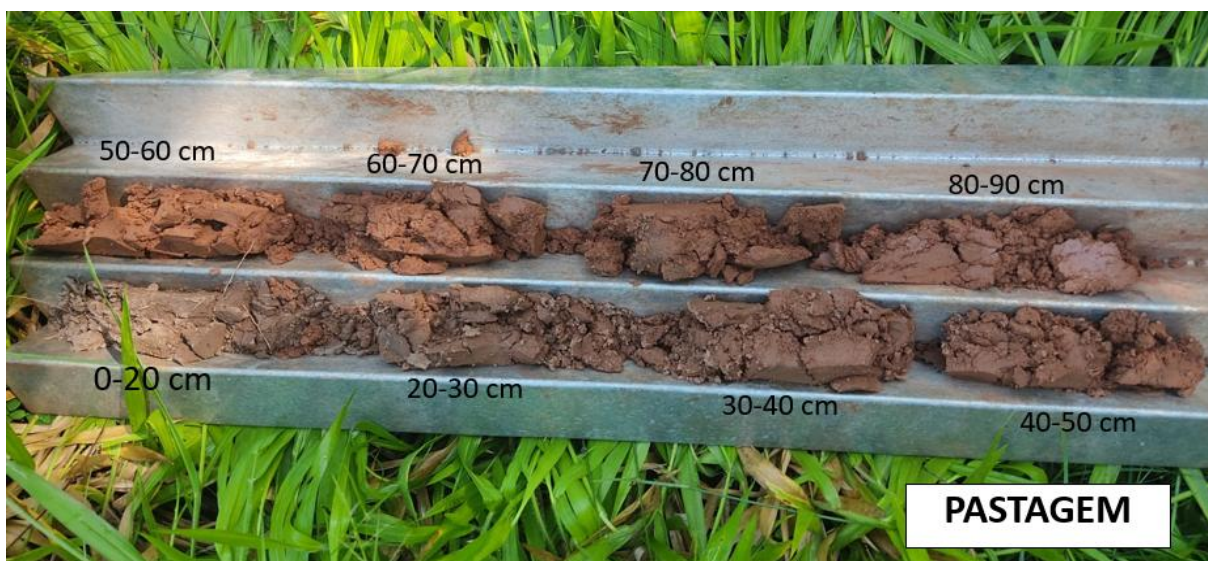


Figura 7. Solo na área de pastagem.

O ponto da área de lavoura, com as coordenadas $24^{\circ} 20' 16,139''$ S e $51^{\circ} 18' 17,957$ W, altitude de 657 m pode ser observado na Figura 8.



Figura 8. Solo na área de lavoura.

3.4 DECLIVIDADE

Os mapas topográficos, curvas de nível e declividade foram realizados no software Autodesk Civil 3D.

A declividade da área de floresta é de 4%, da área de pastagem é de 6% e da área de lavoura é de 9%, sendo categorizado como, suave ondulado nas áreas de floresta e pastagem e ondulado na lavoura, conforme descrito no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018).

O mapa topográfico contendo as curvas de nível dos três usos do solo, floresta, pastagem e lavoura é apresentado na figura 9.

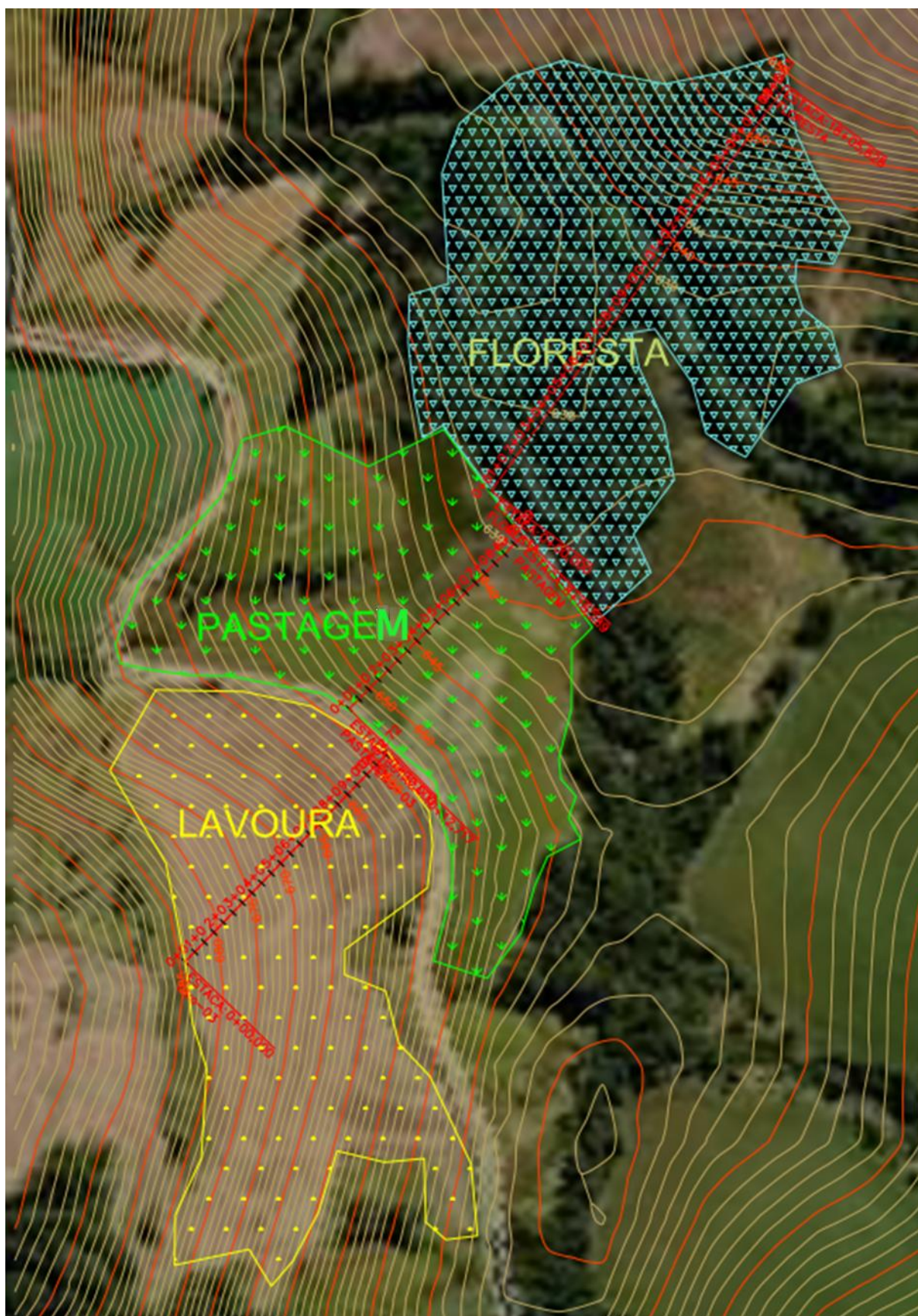


Figura 9. Mapa topográfico dos usos de floresta, pastagem e lavoura.

O mapa topográfico e o perfil de elevação das áreas de floresta, pastagem e lavoura estão apresentados nas figuras 10, 11 e 12, respectivamente.

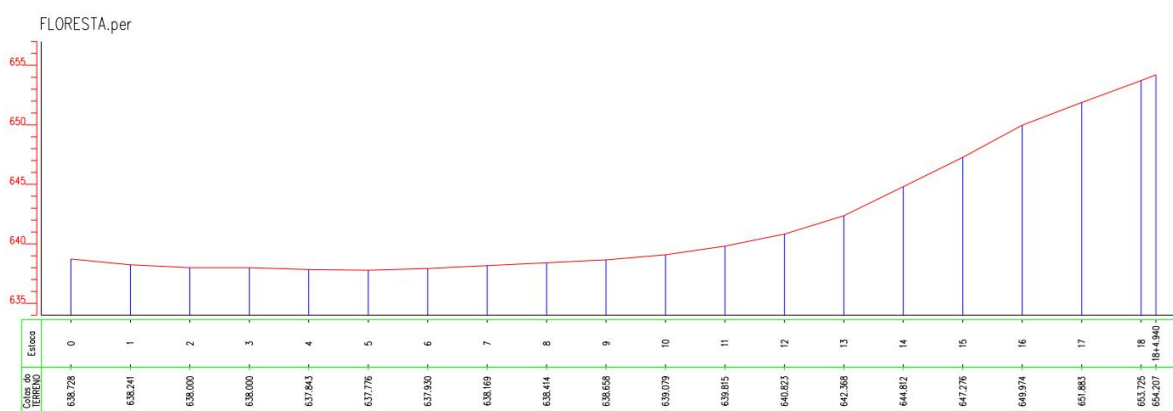


Figura 10. Mapa topográfico e perfil de elevação da área de floresta.

De acordo com a figura 10, a floresta apresenta uma área mais baixa em seu início, e após o rio Rio Branco, a sua elevação aumenta.

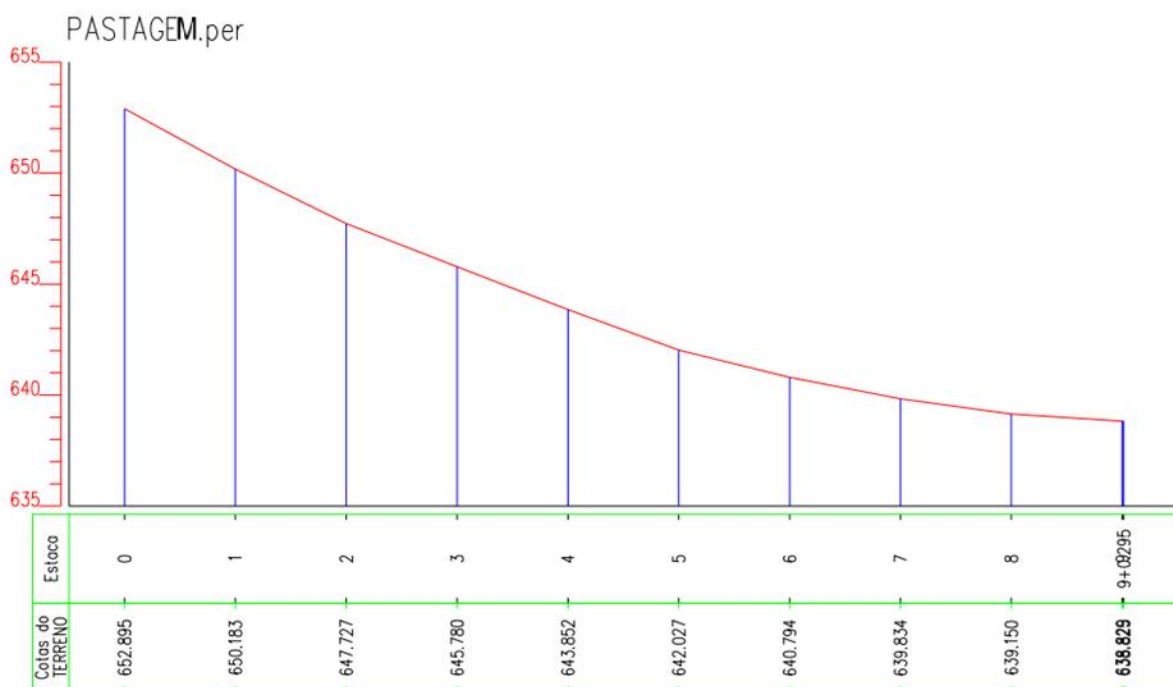
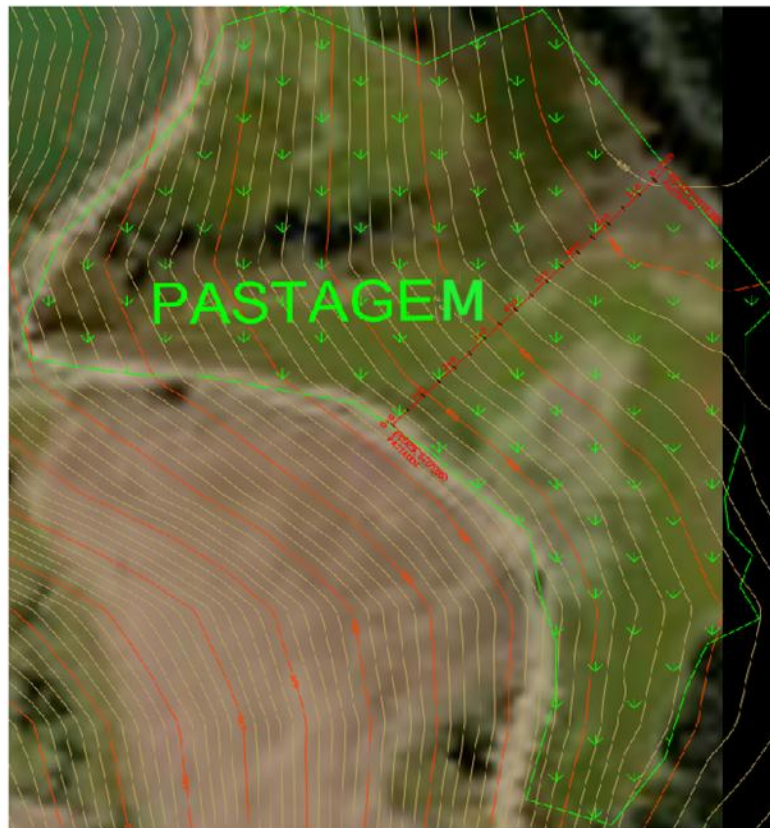


Figura 11. Mapa topográfico e perfil de elevação da área de pastagem.

De acordo com a figura 11, a pastagem apresenta uma área mais alta em seu início, e sua elevação vai reduzindo em sentido ao rio Rio Branco e área de floresta.

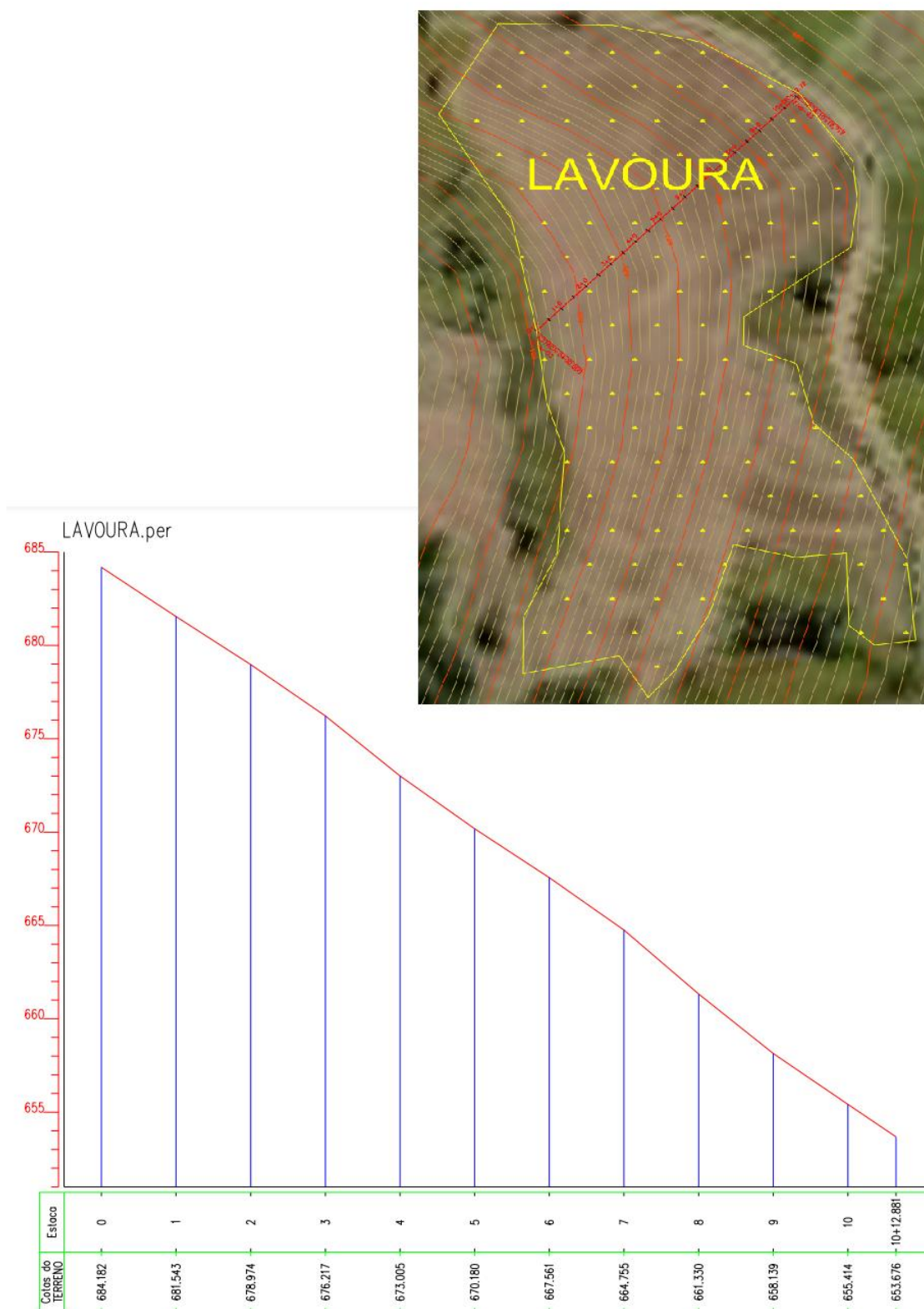


Figura 12. Mapa topográfico e perfil de elevação da área de lavoura.

De acordo com a figura 12, a lavoura apresenta uma área mais alta em seu início, e após a estrada, a sua elevação vai reduzindo em sentido a área de pastagem.

Observa-se que o perfil de elevação da floresta fica em uma altitude inferior a área de lavoura e pastagem.

3.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS

Os atributos químicos das amostras foram analisados no laboratório de Solos da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

O pH de cada amostra foi determinado em solução de cloreto de cálcio (CaCl_2) e leitura em pHmetro. O fósforo (P) e potássio (K) foram extraídos com a solução de Mehlich 1 (HCl a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 a $0,05 \text{ mol L}^{-1}$) e o P determinado por colorimetria em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm e o K^+ em fotômetro de chama. O cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o alumínio (Al) foram extraídos em KCl a 1 mol L^{-1} , o Ca e o Mg determinados por titulação de EDTA e o Al é determinado por titulação com NaOH . A acidez potencial foi estimada pelo método do pH SMP e os valores obtidos na leitura relacionados com a tabela para Solos do Paraná (Pavan et al., 1992). Com os valores obtidos foram estimadas a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e potencial, soma de bases (SB), saturação de alumínio (m%) e saturação de bases (V%) pelas metodologias descritas em Teixeira et al. (2017).

3.5.1 Determinação da matéria orgânica e carbono orgânico total

Os procedimentos para as determinações de matéria orgânica (MO) foram realizados de acordo com metodologias descritas por Pavan et al. (1992).

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método Walkley-Black (Fontana; Campos, 2017), pela oxidação da matéria orgânica via úmida por uma solução de dicromato em meio ácido. O cálculo do COT foi realizado através da equação 1.

$$COT = \frac{(V_2 - V_1)}{g} \times f \times 0,3896 \times 10 \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo,

COT = carbono orgânico total (g kg^{-1});

V1 = Volume de sulfato ferroso gasto na amostra (ml);

V2 = volume de sulfato ferroso gasto na prova em branco (ml);

f = fator de correção da solução de sulfato ferroso;

0,3896 = valor obtido da relação 0,30/0,77 (0,30 é o equivalente grama de C em 100g e 0,77 indica a eficiência do método, de 77%).

3.6 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS

As coletas das amostras de solos para caracterização física foram realizadas conforme a metodologia da Embrapa (2017). As amostragens foram realizadas nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. Os anéis volumétricos, amostras de solo deformadas e indeformadas, foram acomodados em sacos plásticos, bandejas e identificados para posterior análise no laboratório de Solos da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

3.6.1 Granulometria do solo

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta com agitação lenta (Embrapa, 2017), o qual baseia-se na diferença da velocidade de sedimentação entre as partículas de diferentes dimensões.

Inicialmente, foram pesados 20 g de TFSA, os quais foram transferidos para o frasco de agitação, adicionou-se 100 ml de água destilada e 10 mL de NaOH 1 N, e a amostra foi agitada em agitador orbital de mesa a 30 rpm por 16 horas. Após a etapa de agitação, todo o conteúdo da garrafa foi transferido para uma proveta de 1000 mL, completando-se o volume com água destilada. O conteúdo da proveta foi então agitado manualmente por 30 segundos e deixado em repouso.

Após 4 minutos de repouso, realizou-se a pipetagem de 10 mL da solução a uma profundidade de 10 cm (amostragem de silte e argila), transferindo-se a solução para uma placa de Petri, que foi levada à estufa a 105°C por 24 horas.

Decorridas 4 horas de repouso, uma nova pipetagem de 10 mL foi realizada, desta vez a uma profundidade de 5 cm (amostragem de argila). A solução foi novamente colocada em uma placa de Petri e levada à estufa a 105°C por 24 horas.

Finalizada a sedimentação é realizada a pesagem da argila, determinando-se o silte por diferença da amostra total em relação à argila mais areia.

3.6.2 Porosidade e densidade do solo

A porosidade do solo (porosidade total, macroporosidade e microporosidade) foi determinada pelo método da mesa de tensão descritos em Embrapa (2017). Para a porosidade, a amostra é secada em estufa para remover a umidade e pesada, sendo que a diferença entre as duas medidas de massa é usada para determinar o volume de água contido na amostra, e a porosidade pode ser calculada como a razão entre o volume de poros e o volume total do solo. A densidade do solo (D_s) foi obtida através do método do anel volumétrico, desenvolvida por Gardner; Gardner (1958).

3.6.3 Estabilidade de agregados

A metodologia adotada para avaliar a estabilidade de agregados do solo consiste na coleta e preparo de amostras de solo, as quais foram umedecidas para facilitar a separação dos agregados. Utilizou-se um conjunto de oito peneiras em um processo de fracionamento por tamisação úmida para separar os agregados em diferentes frações de tamanho. Após a separação, as frações foram secas e pesadas, permitindo calcular índices como o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG). Os valores de peso dos agregados e areia foram utilizados para calcular o índice de estabilidade dos agregados do solo (IEA) (Madari, 2004).

O DMP representa a estimativa da quantidade relativa de solo presente em diferentes classes de agregados, sendo expresso em milímetros. Este índice tende a aumentar à medida que a proporção de agregados maiores se eleva. O cálculo do DMP, segundo Kemper; Rosenau (1986) é dado pela equação 2.

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i * w_i \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo,

DMP = Diâmetro Médio Ponderado (mm);

x_i = diâmetro médio de cada classe de agregados (mm);

w_i = proporção de cada classe de agregados em relação ao total.

O DMG indica o tamanho mais comum dos agregados, expresso em milímetros.

O cálculo do DMG, conforme Kemper; Rosenau (1986) é dado pela equação 3.

$$DMG = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \log x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo,

DMG = Diâmetro Médio Geométrico (mm);

w_i = peso de agregados (g) dentro de uma classe de agregados de diâmetro médio x_i ;

x_i = diâmetro médio de cada classe de agregados (mm).

O IEA em água foi calculado com a proporção da massa dos agregados retidos na peneira em relação à massa inicial do solo adicionado ao recipiente de ensaio, e é expresso como a porcentagem de agregados estáveis em relação à massa inicial do solo. Esse método avalia a capacidade dos agregados do solo de resistirem à destruição quando submetidos à ação da água e foi desenvolvida por Le Bissonais (1996). O IEA quantifica o grau de agregação do solo, variando de 0 a 100%. O cálculo do IEA, de acordo com Castro Filho et al. (1998) é dado pela equação 4.

$$IEA = \frac{\text{Peso da amostra seca} - \text{wp25} - \text{areia}}{\text{Peso da amostra seca} - \text{areia}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo,

IEA = Índice de Estabilidade dos Agregados do solo (%);

wp25 = peso dos agregados < 0,25 mm (g);

areia = peso de partículas de diâmetro entre 2,0 – 0,053 mm (g).

3.6.4 Argila dispersa em água

A argila dispersa em água foi determinada pelo método da pipeta com agitação lenta, conforme a metodologia da Embrapa (1997). As amostragens foram realizadas nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Inicialmente, foram pesados 20 g de TFSA, os quais foram transferidos para o frasco de agitação, e adicionou-se 100 ml de água destilada, e a amostra foi agitada em agitador orbital de mesa a 30 rpm por 16 horas. Após a etapa de agitação, todo o conteúdo da garrafa foi transferido para uma proveta de 1000 mL, completando-se o

volume com água destilada.

O conteúdo da proveta foi então agitado manualmente por 30 segundos e deixado em repouso. Passadas quatro horas de repouso, foi realizada a pipetagem de 10 mL, a 5 cm de profundidade, com o material sendo colocado em placas de Petri e levado à estufa a 105°C por 24 horas para secagem final.

Com os valores encontrados na pipetagem, foram calculados os valores de argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão (ID) e índice de floculação (IF).

O ID foi calculado através da equação 5, de acordo com Tavares Filho (2016).

$$ID = \frac{ADA}{Argila\ total} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo,

ID = índice de dispersão do solo (%);

ADA = argila dispersa em água (g kg⁻¹);

Argila total = valor da argila total (g kg⁻¹).

O IF foi calculado através da equação 6, de acordo com Tavares Filho (2016).

$$IF = 100 - ID \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo,

IF = índice de floculação do solo (%);

ID = índice de dispersão do solo (%).

3.7 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS BIOLÓGICOS

Os atributos biológicos foram analisados apenas na profundidade de 0-10 cm, pois é nessa profundidade que ocorre a maior atividade microbiana.

3.7.1 Determinação do carbono da biomassa microbiana e nitrogênio da biomassa microbiana

O carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana foram extraídos das amostras de solo pelo método de fumigação-extração, proposto por Vance et al.

(1987).

Para a determinação do carbono da biomassa microbiana (CBM), foram utilizados 8 mL de extrato e 2 mL de dicromato de potássio $0,066 \text{ mol L}^{-1}$, ao qual são adicionados 5 mL de ácido sulfúrico concentrado, e essa mistura é então resfriada em capela durante 30 minutos. Posteriormente, adiciona-se 80 mL de ácido orto-fosfórico 6,25% e 3 gotas de difenilamina 1% diluída em ácido sulfúrico concentrado. A titulação foi realizada com sulfato ferroso amoniacal a 0,03 N padronizado até que se observe uma mudança para a cor verde.

Para a determinação do nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), foram pesados 0,5 g de catalisador $\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{CuSO}_4$ na concentração 10:1, e adicionados a um tubo de digestão contendo 20 ml do extrato da amostra. Em seguida, 1,5 mL de ácido sulfúrico concentrado são incorporados e ficam na estufa a 105°C por 24 horas para reduzir seu volume à metade.

Posteriormente, o material é transferido para um bloco digestor, onde a temperatura é elevada gradualmente de 100°C até 350°C , com incrementos de 50°C a cada 30 minutos, até que o líquido assuma uma coloração verde fluorescente. Os tubos são removidos do bloco digestor e deixados para esfriar em uma estante por 20 minutos. As amostras foram homogeneizadas em vortex, deixadas em repouso por 120 minutos, e a leitura da absorvância é realizada em um espectrofotômetro a 697 nm.

3.7.2 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo (RBS), foi determinada pelo método da incubação, proposto por Jenkinson; Powlson (1976) e adaptado por Silva et al. (2007) e expresso em $\text{mg C-CO}_2 \text{ Kg solo}^{-1} \text{ hora}^{-1}$. A RBS relaciona a atividade microbiana, a partir da liberação de CO_2 , via degradação da matéria orgânica do solo, nas amostras não-fumigadas após um período de 5 a 10 dias de incubação.

Inicia-se com a pesagem de 50g de solo, que é então acondicionado em frascos de vidro de 100 mL com tampas herméticas, em duplicata. Para cada amostra, 10 mL de NaOH 1M são pipetados em béqueres de polipropileno de 30 mL e imediatamente transferidos para os respectivos frascos contendo o solo pesado. Os frascos são fechados com tampas e vedados com plástico insulfilm para evitar tanto a entrada

de CO₂ externo quanto a fuga do CO₂ produzido internamente. Frascos de controle, sem solo, são preparados seguindo o mesmo procedimento para servir como brancos na análise.

Tanto as amostras quanto os controles são incubados em condições controladas de temperatura, mantidas entre 25°C e 28°C, em ambiente isento de luminosidade, por 10 dias, dependendo das especificações do experimento. Após o período de incubação, os frascos são abertos e o NaOH, que absorveu o CO₂ produzido, é tratado com 2 mL de cloreto de bário 10% (m/v) para precipitar o carbonato formado.

Segue-se uma titulação com HCl 0,5M previamente padronizado, adicionando 2 gotas de fenolftaleína 1% (m/v) como indicador. A titulação é realizada sob agitação magnética até que a mudança de coloração da solução de rosa para incolor indique o ponto final. O cálculo da RBS é dado pela equação 7.

$$RBS = \frac{(Vb-Va)*M*6*1000}{\frac{PS}{T}} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo,

RBS = respiração basal do solo (mg C-CO₂ kg⁻¹ hora⁻¹);

Vb = volume de ácido clorídrico gasto na titulação da solução controle (branco) (ml);

Va = volume gasto na titulação da amostra (ml);

M = molaridade exata do HCl;

Ps = massa de solo seco (g); e

T= tempo de incubação da amostra (horas).

3.7.3 Quociente metabólico

Para calcular o quociente metabólico (qCO₂) foram analisados CBM (Vance et al., 1987) e a RBS (Jenkinson; Powlson, 1976). O cálculo do qCO₂, proposto por Anderson; Domsch (1993) é dado pela equação 8.

$$qCO_2 = \frac{RBS}{CBM * 10^{-3}} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo,

qCO₂ = Quociente metabólico do solo (mg C-CO₂ g⁻¹ CBM hora⁻¹);

RBS = Respiração basal do solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}$);

CBM = Carbono da biomassa microbiana do solo ($\text{mg C kg}^{-1} \text{ solo}$).

3.8 ESTATÍSTICA

O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento experimental inteiramente causalizado (DIC) entre as três áreas, com cinco repetições cada. Os dados foram comparados pelo teste ANOVA seguido de Tukey a 5% de probabilidade. Para ordenação dos dados utilizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) e a análise de correlação de Pearson entre a matéria orgânica e carbono orgânico total e os atributos físicos, químicos e biológicos, entre as variáveis para cada uso do solo. A estatística foi realizada no software R (R Development Core Team, 2024).

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. S. D.; FERREIRA, V. A. S.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, n.9, p.1539-1547, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900053>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711 – 728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, A. K. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v.25, n.3, p.393-395, 1993. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)

ANDERSON, T. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.1, n.2, p.285-293, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4)

BACH, E. M.; WILLIAMS, R. J.; HARGREAVES, S. K.; YANG, F.; HOFMOCKEL, K. S. Greatest soil microbial diversity found in micro-habitats. *Soil Biology and Biochemistry*, v.118, p.217-226, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.12.018>

BARANOSKI, G. V.; KIMMEL, B. W.; CHEN, T. F.; MIRANDA, E. Influence of Sand Grain Morphology and Iron-Oxide Distribution Patterns on the Visible and Near-Infrared Reflectance of Sand-Textured Soils. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. v.7, n.9, 2014. <https://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2299813>

BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. D. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. D. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de floresta submetido a diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.4, p.1471-1478, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400011>

BARROS, L. R.; RIBON, A. A.; FERNANDES, K. L.; SOUZA, J. L. O.; CARRECHEL, V.; BACKES, C.; SANTOS, A. J. M.; ALVES, A. R. Integrated management systems for the improvement of the physical-hydric quality of a cerrado oxisol. *Australian Journal of Crop Science*, v.12, n.4, p.711-716, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.05.PNE793>

BAYER, C.; GOMES, J.; ZANATTA J. A.; VIEIRA, F. C. B.; DIECKOW, J. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. *Soil and Tillage Research*, v.161, p.86-94, 2016. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.03.011>

BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; GERALDES, A. P. D. A.; FERNANDES, S. A. P. Carbono e nitrogênio em solo de uma cronossequência de floresta tropical-

pastagem de Paragominas. *Scientia Agrícola*, v.56, p.777-783, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000400003>

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.25, n.3, p.208-218, 2019. <https://doi.org/10.36812/pag.2019253208-218>

BHATTACHARYYA, R.; RABBI, S. M.; ZHANG, Y.; YOUNG, I. M.; JONES, A. R.; DENNIS, P. G.; DALAL, R. C. Soil organic carbon is significantly associated with the pore geometry, microbial diversity and enzyme activity of the macro-aggregates under different land uses. *Science of the Total Environment*, v. 778, p. 146286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146286>

BISSETT, A.; RICHARDSON, A. E.; BAKER, G.; THRALL, P. H. Long-term land use effects on soil microbial community structure and function. *Applied Soil Ecology*, v.51, n.1, p.66-78, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.08.010>

BORGHI, É.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C.; MATEUS, G. P. Produtividade e qualidade das forragens de milho e de *Brachiaria brizantha* em sistema de cultivo consorciado. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.5, n.3, 2006. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v5n03p%25p>

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, p.790, 2009.

BREVIK, E. C.; HANNAM, J.; KRZIC, M.; MUGGLER, C.; UCHIDA, Y. The importance of soil education to connectivity as a dimension of soil security. *Soil Security*, v.7, p.100066, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100066>

BREVIK, E. C.; STEFFAN, J. J.; RODRIGO-COMINO, J.; NEUBERT, D.; BURGESS, L. C.; CERDÀ, A. Connecting the public with soil to improve human health. *European Journal of Soil Science*, v.70, n.4, p.898-910, 2019. <https://doi.org/10.1111/ejss.12764>

BRUNETTO, G.; COMIN, J. J.; SCHMITT, D. E.; GUARDINI, R.; MEZZARI, C. P.; OLIVEIRA, B. S.; CERETTA, C. A. Changes in soil acidity and organic carbon in a Sandy Typic Hapludalf after medium-term pig-slurry and deep-litter application. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1620-1628, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500026>

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. D.; REIS, E. F. D.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. D. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* v.33, p.147-157, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>

CARVALHO, M. M.; FENGLER, F. H.; PECHE FILHO, A.; LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. I. Análise da morfométrica de agregados do solo em áreas mineradas em diferentes estágios de recuperação na Amazônia. *Ciência Florestal*, v.32, p.2156-2179, 2023. <https://doi.org/10.5902/1980509867351>

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade de agregados e

sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.527-538, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019>

CASTRO, G. C.; VIEIRA, C. R.; DOS SANTOS WEBER, O. L. Carbono orgânico e nitrogênio total nas frações granulométricas e húmicas em solos sob diferentes texturas. *Nativa*, v.6, n.6, p.575-581, 2018. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i6.5378>

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; DE SOUSA, R. O.; TIMM, L. C. Textura do solo: Conceitos e aplicações em solos arenosos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v.4, n.1, p.31-37, 2017. <https://doi.org/10.15210/rbes.v4i1.11576>

CHERUBIN, M. R.; MAIA, S. M. F.; DAMIAN, J. M.; CERRI, C. E. P. Matéria orgânica do solo em áreas de pastagens no Brasil. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical, 1ed. Brasília: DF: Embrapa, p.601-625, 2023.

CHOROVER, J.; AMISTADI, M. K.; CHADWICK, O. A. Surface charge evolution of mineral-organic complexes during pedogenesis in Hawaiian basalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.68, n.23, p.4859-4876, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.06.005>

COSTA, O. V.; CANTARUTTI, R. B.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. D.; NACIF, P. G. S.; FARIA, J. C. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de tabuleiro costeiro no sul da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.33, p.1137-1145, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500007>

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. D. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. D. O.; SANTOS, G. D. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). *Acta Amazônica*, v.37, p.91-98, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000100010>

DEMETER, I. Chemical and microbiological properties of Hungarian sandy soils under different management practices. *Applied Ecology and Environmental Research*, v.16, p.3473-3488, 2018. https://doi.org/10.15666/AEER/1603_34733488

DIACONO, M.; MONTEMURRO, F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v.30, p.401-422, 2010. <https://doi.org/10.1051/agro/2009040>

DICK, D. P.; GONÇALVES, C. N.; DALMOLIN, R. S.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; MARTIN-NETO, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. *Geoderma*, v.124, n.3, p.319-333, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.008>

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. D.; BALIEIRO, F. D. C.; FONTANA, A., SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e

perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.51, p.1003-1020, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>

DUIKER, S. W.; RHOTON, F. E.; TORRENT, J.; SMECK, N. E.; LAL, R. Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation. Soil Science Society of America Journal, v.67, n.2, p.606-611, 2003. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.6060>

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C. D.; PEREIRA, M. G.; PINHEIRO, É. F. M.; VALLADARES, G. S. Substâncias húmicas e relação com atributos edáficos. Bragantia, Campinas, v.70, n.1, p.157-165, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100022>

ELFSTRAND, S.; HEDLUND, K.; MÅRTENSSON, A. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. Applied Soil Ecology, v.35, n.3, p.610-621, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.09.011>

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, p.212, 1997.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. Brasília, DF: Embrapa, 3. ed., p.577, 2017.

FAGERIA, N. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.43, p.2063-2113, 2012. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>

FAO. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Main report. Rome, 2022.

FAUCI, M. F.; DICK, R. P. Microbial biomass as an indicator of soil quality: Effects of long-term management and recent soil amendments. Defining soil quality for a sustainable environment, v.35, p.229-234, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c17>

FERNANDES, J. C. F.; PEREIRA, M. G.; DA SILVA NETO, E. C.; NETO, T. D. A. C. Caracterização de agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos em áreas sob domínio de floresta atlântica. Revista Caatinga, v.30, n.1, p.59-67, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n107rc>

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono Orgânico (Cáp. 1). In: Manual de métodos de análise de solo, p.360–367. Brasil, Embrapa-RJ, 2017.

FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E.; SIX, J.; WALL, D. H.; CERRI, C. C. Linking soil engineers, structural stability, and organic matter allocation to unravel soil carbon responses to land-use change. Soil Biology and Biochemistry, v.150, p.e107998, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107998>

FREITAS, V. S.; VAZ, C. M. P.; MILORI, D. M. B. P. Influência da textura do solo no índice de humificação obtido por fluorescência induzida por laser em amostras de solo.

In: Embrapa Instrumentação-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. Ciência, inovação e mercado: anais. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019.

FRONZA, F. L.; DA ROCHA, A. S.; PLETSCHE, A. L. Estimativa de perda de solos por erosão laminar em duas bacias hidrográficas do Oeste Paranaense. *Nature and Conservation*, v.15, n.1, p.129-140, 2022. <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2022.001.0012>

GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. A problem of water movement in soils resulting from partial surface sealing. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.22, n.3, p.187-191, 1958.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. *Semina: Ciências Agrárias*. v.36, n.2, p.693-704, 2015. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p693>

GIACOMETTI, C.; DEMYAN, M. S.; CAVANI, L.; MARZADORI, C.; CIAVATTA, C.; KANDELER, E. Chemical and microbiological soil quality indicators and their potential to differentiate fertilization regimes in temperate agroecosystems. *Applied Soil Ecology*, v.64, p.32-48, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.002>

GOMES, M. F.; VASCONCELOS, S. S.; VIANA-JUNIOR, A. B.; COSTA, A. N. M.; BARROS, P. C.; RYOHEI KATO, O.; CASTELLANI, D. C. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. *Land Degradation & Development*, v.32, n.15, p.4313-4326, 2021. <https://doi.org/10.1002/ldr.4038>

GOOGLE EARTH. Vista da Cidade de Rio Branco do Ivaí do Google Earth. Google Earth. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Capturado em: 05 ago. 2023.

HAMZA, M.; ANDERSON, W. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, v.82, p.121-145, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

HUANG, J. Y. SONG, C. C.; SONG, Y. Y.; LIU, D. Y.; WAN, Z. M.; LIAO, Y. J. Influence of freshwater marsh tillage on microbial biomass and dissolved organic carbon and nitrogen. *Huan jing ke xue= Huanjing kexue*, v.29, n.5, p.1380-7, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Divisão Territorial Brasileira – DTB, 2020.

IBRAHIM, M. M.; ALIYU, J. Comparison of Methods for saturated hydraulic conductivity determination: field, laboratory and empirical measurements (A Pre-view). *British Journal of Applied Science & Technology*, v.15, n.3, p.1–8, 2016. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/24413>

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Caderno Estatístico: Município de Rio Branco do Ivaí-PR. Curitiba: IPARDES, 2024. Disponível

em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=86848>>. Acesso em: set. 2024.

ITCG – Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. Base Cartográfica. Curitiba: ITCG, 2010. Base digital. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-03/plano_cartografico_2010_aprovado.pdf>. Acesso em: set. 2024.

JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, v.8, n.3, p.209-213, 1976. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5)

JIA, G. M.; ZHANG, P. D.; WANG, G.; CAO, J.; HAN, J. C.; HUANG, Y. P. Relationship Between Microbial Community and Soil Properties During Natural Succession of Abandoned Agricultural Land. *Pedosphere*, v.20, n.3, p.352-360, 2010. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60024-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60024-0)

KARLEN D. L., STOTT D. E., MIKHA M. M. Laboratory methods for soil health analysis. Soil health series. Madison: Wiley & Sons. v.2, 2021.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, p.425-442, 1986. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>

KING, A. E.; ALI, G. A.; GILLESPIE, A. W.; WAGNER-RIDDLE, C. Soil organic matter as catalyst of crop resource capture. *Frontiers. Environmental Science*, v.8, p.50, 2020. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00050>

KOVEN, C. D.; HUGELIUS, G.; LAWRENCE, D. M.; WIEDER, W. R. Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. *Nature Climate Change*, v.7, n.11, p.817-822, 2017. <https://doi.org/10.1038/nclimate3421>

LAL, R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, v.71, p.141–191, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)71014-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)71014-0)

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of crustability and erodibility: 1. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, v.47, p.425-437, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L.; MACHADO, P. L. O. A.; GALVÃO, J. C. C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.5, p.821-832, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500006>

LIENHARD, P.; TERRAT, S.; PRÉVOST-BOURÉ, N. C.; NOWAK, V.; RÉGNIER, T.; SAYPHOUMMIE, S.; RANJARD, L. Pyrosequencing evidences the impact of cropping on soil bacterial and fungal diversity in Laos tropical grassland. *Agronomy for Sustainable Development*, v.34, n.3, p.525-533, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13593->

[013-0162-9](#)

LIMA, S. S. D.; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. C. D.; FERNANDES, D. A. C.; AQUINO, A. M. D. Biogenic and physiocogenic aggregates under different crops with black oat in Nova Friburgo, Brazil. *Revista Caatinga*, v.33. p.299-309, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n203rc>

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* v.28, p.175-187, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100017>

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia* v.38, p.133-146, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015>

MADARI, B. E. Fracionamento de agregados: procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo. Comunicado técnico 22. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

MEHNAZ, K. R.; KEITEL, C.; DIJKSTRA, F. A. Phosphorus availability and plants alter soil nitrogen retention and loss. *Science of the Total Environment*, v.671, p.786-794, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.422>

MELO, G. B.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; GUARESCHI, R. F.; SOARES, P. F. C. Estoques e frações da matéria orgânica do solo sob os sistemas plantio direto e convencional de repolho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.51, p.1511-1519, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900050>

MINASNY, B.; ARROUAYS, D.; MCBRATNEY, A. B.; ANGERS, D. A.; CHAMBERS, A.; CHAPLOT, V.; WINOWIECKI, L. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, v.292, p.59-86, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. D.; SILVA, J. D.; PAULINO, L. A. Total organic carbon stock and granulometric fractioning of organic matter in soil use systems in Cerrado. *Revista de Ciências Agroveterinarias*, v.18, n.1, p.136–145, 2019.

NASCIMENTO, D. M. et al. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil and Tillage Research*, v.186, n.1, p.292-299, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.016>

NITSCHÉ, P. R. et al. Atlas climático do estado do Paraná. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 2019.

NSABIMANA, D.; HAYNES, R.; WALLIS, F. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. *Applied Soil Ecology*, v.26, n.1, p.81-92, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.12.005>

OADES, J. M. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, v.5, n.1, p.35-

70, 1988. <https://doi.org/10.1007/BF02180317>

ONU BR. Organização das Nações Unidas no Brasil. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2024. Perspectivas da População Mundial 2024: Resumo dos Resultados (UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9).

PANKHURST, C. E.; DOUBE, B.; GUPTA, V. V. S. R. Biological Indicators of Soil Health. Wallingford: CAB International, 1997.

PARKIN, G.; O'donnell, G.; Ewen, J.; Bathurst, J. C.; O'Connell, P. E.; Lavabre, J. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 2. Case study for a Mediterranean catchment. Journal of hydrology, v.175, n.1-4, p.595-613, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80027-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80027-8)

PAULA, M. D.; DE ASSIS, R. P.; BAHIA, V. G.; OLIVEIRA, C. D. Efeitos do manejo dos resíduos culturais, adubos verdes, rotação de culturas e aplicação de corretivos nas propriedades físicas e recuperação dos solos. Informe Agropecuário, v.191, p.66-70, 1998.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. D. F.; ZEMPULSKI, H. D. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR. (Circular, 76), p.38, 1992.

PENG, X.; YAN, X.; ZHOU, H.; ZHANG, Y. Z.; SUN, H. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization. Soil and Tillage Research, v.146, p.89-98, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.04.003>

PENHA SIMON, C.; VITÓRIA, E. L.; GRAÇA LACERDA, E.; AVANCINI, Y. S.; RODRIGUES, T. F.; SIMON, C. A. Emissão de CO₂, atributos físicos e carbono orgânico total em diferentes sistemas de preparo do solo. Nativa, v.7, n.5, p.494-499, 2019. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i5.6273>

PIATI, G. L. Atributos físicos do solo e características agronômicas da soja em sistemas de sucessão e rotação de culturas. Tese. Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados – MS, 2022.

QIU, L.; WEI, X.; ZHANG, X.; CHENG, J.; GALE, W.; GUO, C.; LONG, T. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland. Plant and Soil, v.355, p.299-309, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1099-x>

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <<http://www.R-project.org>> Acesso em out. 2024.

RABBI, S. M. F.; DANIEL, H.; LOCKWOOD, P. V.; MACDONALD, C.; PEREG, L.; TIGHE, M.; YOUNG, I. M. Physical soil architectural traits are functionally linked to carbon decomposition and bacterial diversity. Scientific Reports, v.6, n.1, p.1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep33012>

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, v.314, p.122-137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

RAMBO, K. L.; SHIMADA, B. S.; SIMON, M. V.; CUNHA, L. D. S.; FINKEN, P. H. A rotação de culturas na conservação do solo. *Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente*, v.2, n.3, p.28-28, 2021. <https://doi.org/10.51189/rema/1617>

RAMOS, H. M. M.; SOUSA, R. S.; NUNES, L. A. P. L.; MATOS FILHO, C. H. A.; MOURA, J. S. Estoque de carbono de um neossolo quartzarênico sob diferentes usos: Carbon stock in a quartzarenic neosol under different land uses. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v.6, n.1, p.910-922, 2023. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n1-080>

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PERAZA, J. E. S.; DA COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. *Geoderma Regional*, v.21, n.1, p.e00277, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00277>

REN, W.; SUN, N.; XU, M.; ZHANG, X.; WU, L.; XU, M. Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, v.194, p.104291, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.06.008>

ROSSI, C. Q.; PINTO, L. A. D. S. R.; DE MOURA, O. V. T.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G. Matéria orgânica do solo em agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos sob manejo agroecológico. *Revista Caatinga*, v.36, n.1, p.167-176, 2023. <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n118rc>

RUAMPS, L. S.; NUNAN, N.; CHENU, C. Microbial biogeography at the soil pore scale. *Soil Biology and Biochemistry*, v.43, n.2, p.280-286, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.10.010>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COLEHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília: Embrapa Solos. Cap.19, p.294-295, 2018.

SHAH, F.; WU, W. Soil and Crop Management Strategies to Ensure Higher Crop Productivity within Sustainable Environments. *Sustainability*, 2019. <https://doi.org/10.3390/SU11051485>

SHARMA, S.; RAMESH, A.; SHARMA, M. P.; JOSHI, O. P.; GOVAERTS, B.; STEENWERTH, K. L.; KARLEN, D. L. Microbial community structure and diversity as indicators for evaluating soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, v.42, n.3, p.218-227, 2010. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9513-8_11

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; RALISCH, R.; HUNGRIA, M.; DE FATIMA GUIMARÃES, M. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. *Soil and Tillage Research*, v.142, p.42-53, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soil.2014.04.006>

SILVA, D. R.; OLIVEIRA, F. P.; SILVA, P. L. F.; MARTINS, A. F. Qualidade do solo sob diferentes condições de uso no semiárido paraibano. Revista Valore, v.8, p.25-36, 2023. <https://doi.org/10.22408/reva802023114525-36>

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). Comunicado Técnico 99. Embrapa, 2007.

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.

SILVA, P. L. F.; SABINO, B. T. S.; DE OLIVEIRA, F. P.; DE SOUZA SANTOS, J. W.; MARTINS, A. F.; CAGNA, C. P. Estresse efetivo de solo arenoso sob integração lavoura-pecuária nos tabuleiros costeiros do Rio Grande do Norte (Brasil). Revista Brasileira de Meio Ambiente, v.10, n.3, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7519123>

SIMON, C. D. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B. D.; CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.46, p.e0210103, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.17, n.12, p.1301-1309, dez. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>

TAVARES FILHO, J. Física e Conservação do Solo e Água [livro eletrônico]. Londrina: Eduel, 2016.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; DE GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.725-730, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300022>

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. D. C.; RIBON, A. A. Physical properties of dystrophic Red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, n.3, p.925-933, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300034>

TAVARES FILHO, J.; MELO, T. R. D.; MACHADO, W.; MACIEL, B. V. Structural changes and degradation of Red Latosols under different management systems for 20 years. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.38, n.4, p.1293-1303, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400025>

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.23, n.2, p.393-399, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000200022>

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of Oxisols in Paraná, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.899-906, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300031>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solos. 3.ed. Revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, p.573, 2017.

TORNQUIST, C. G.; VEZZANI, F. M.; WEILER, D. A.; SCHENATO, R. B. Modelagem da matéria orgânica do solo. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. EMBRAPA. Cap.8, p.255, 2023.

TRANI, P. E.; TERRA, M. M.; TECCHIO, M. A.; TEIXEIRA, L. A. J.; HANASIRO, J. Adubação orgânica de hortaliças e frutíferas. Instituto Agrônomo de Campinas, IAC, 2013.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. Na extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, v.19, p.703-707, 1987. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)

VASCONCELOS, R. F.; SOUZA, E. R. D.; CANTALICE, J. R.; SILVA, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v.18, n.4, p.381-386, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000400004>

WANG, L.; KAUR, M.; ZHANG, P.; LI, J.; XU, M. Effect of Different Agricultural Farming Practices on Microbial Biomass and Enzyme Activities of Celery Growing Field Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v.18, n.23, p.12862, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312862>

WANG, Y.; HU, N.; GE, T.; KUZHYAKOV, Y.; WANG, Z. L.; LI, Z.; LOU, Y. Soil aggregation regulates distributions of carbon, microbial community and enzyme activities after 23-year manure amendment. *Applied Soil Ecology*, v.111, p.65-72, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.11.015>

WARD, P. S.; BELL, A. R.; DROPELMANN, K.; BENTON, T. G. Early adoption of conservation agriculture practices: Understanding partial compliance in programs with multiple adoption decisions. *Land Use Policy*, v.70, n.1, p.27-37, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.001>

WEZEL, A.; CASAGRANDE, M.; CELETTE, F.; VIAN, J. F.; FERRER, A.; PEIGNÉ, J. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, Paris, v.34, n.1, p.1-20, 2014. <https://dx.doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>

WU, J.; BUCKLEY, H. L.; CURRY, L.; STEVENSON, B. A.; SCHIPPER, L. A.; LEAR, G. Livestock exclusion reduces the spillover effects of pastoral agriculture on soil bacterial communities in adjacent forest fragments. *Environmental Microbiology*, 2021.

<https://doi.org/10.1111/1462-2920.15473>

WU, X.; WEI, Y.; WANG, J.; XIA, J.; CAI, C.; WEI, Z. Effects of soil type and rainfall intensity on sheet erosion processes and sediment characteristics along the climatic gradient in central-south China. *Science Total Environ*, v.621, p.54-66, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.202>

XIAO, R.; MAN, X.; DUAN, B. Carbon and nitrogen stocks in three types of *Larix gmelinii* forests in Daxing'an mountains, Northeast China. *Forests*, v.11, p.305, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11030305>

YADAV, R. P.; GUPTA, B.; BISHT, J. K.; KAUSHAL, R.; MONDAL, T.; MEENA, V. S. Impact of Land Uses on Microbial Biomass C, N, and P and Microbial Populations in Indian Himalaya. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Agricultural Sustainability*, p.233-255, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7553-8_12

YANG, Y.; ASHWORTH, A. J.; DEBRUYN, J. M.; WILLETT, C.; DURSO, L. M.; COOK, K.; OWENS, P. R. Soil bacterial biodiversity is driven by long-term pasture management, poultry litter, and cattle manure inputs. *PeerJ*, v.7, p.e7839, 2019. <https://doi.org/10.7717/parj.7839>

YINGZHI, G.; XINGGUO, H.; SHIPING, W. The effects of grazing on grassland soils. *Acta Ecologica Sinica*, v.24, n.4, p.790-797, 2004.

ZAMAN, M.; KLEINEIDAM, K.; BAKKEN, L.; BERENDT, J.; BRACKEN, C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; MÜLLER, C. Climate-Smart Agriculture Practices for Mitigating Greenhouse Gas Emissions. *Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options using Nuclear and Related Techniques*, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55396-8_8

ZHANG, S.; LI, Q.; ZHANG, X.; WEI, K.; CHEN, L.; LIANG, W. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, v.124, p.196-202, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.007>

5 CAPÍTULO 1 - ARTIGO A: INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO ARENOSO

5.1 RESUMO

A agropecuária no Brasil vem passando por diversos problemas, especialmente relacionados à degradação dos solos causada por práticas inadequadas de manejo. A mudança da vegetação original para práticas agropecuárias altera os atributos físicos do solo. Essa degradação é acentuada em solos arenosos, pois apresentam maiores fragilidades que tornam o manejo e o seu uso intensivo desafiador. O objetivo foi avaliar como os usos de lavoura, pastagem e floresta influenciam nos atributos físicos de um solo arenoso e como se relacionam com o carbono orgânico total. A área de estudo está localizada no município de Rio Branco do Ivaí - PR, em solo arenoso sob os diferentes usos, lavoura, pastagem e floresta nativa. Foram avaliados a granulometria, pH, argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão (ID), índice de floculação (IF), matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT), macro e microporosidade, porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) em duas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) entre as três áreas, com cinco repetições cada, os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA e comparados pelo teste Tukey (5%), análise de componentes principais (PCA) e correlação de Pearson entre as variáveis para cada uso do solo. O uso com lavoura favorece a compactação e afeta a relação de distribuição entre macro e microporos do solo, a pastagem apresentou maior valor de porosidade total, indicando compactação e a estabilidade de agregados aumentou em profundidade, devido ao solo estar menos compactado na camada de 10-20 cm, e a floresta apresentou uma boa relação entre macro e microporos, menor densidade do solo e maior estabilidade de agregados, refletindo um ambiente menos afetado pela intervenção antrópica e das máquinas agrícolas. Os níveis de COT foram menores no uso da lavoura, enquanto a pastagem apresentou níveis intermediários. Esses resultados indicaram que o uso da pastagem afetou menos os atributos físicos do que o uso com lavoura intensiva, a qual afetou a estrutura do solo, produzindo agregados menos estáveis e menores. O COT influencia a agregação do solo de maneiras distintas conforme o uso do solo, o que foi evidenciado pela sua correlação com os atributos físicos. Na floresta, o aumento do COT promove a agregação do solo, aumentando o DMP, DMG e IAE. Em pastagens, o COT está associado ao aumento da macro e microporosidade, PT, Ds e IF. E na lavoura, o aumento do COT favorece o DMG e ID. O teor de carbono orgânico total influenciou na agregação no uso da floresta, e na aeração no uso da pastagem. Conclui-se que o uso do solo afetou a qualidade física do solo e os diferentes usos alteram a estabilidade e agregação do solo, com maior impacto negativo no uso do solo com lavoura.

Palavras-chave: estrutura do solo, compactação, degradação do solo, índice de estabilidade, manejo do solo.

5.2 ABSTRACT

Agriculture in Brazil has been facing several problems, especially related to soil degradation caused by inadequate management practices. The change of original vegetation to agricultural practices alters the physical attributes of the soil. This degradation is accentuated in sandy soils, as they present greater weaknesses that make management and intensive use challenging. The objective was to evaluate how crop, pasture and forest uses influence the physical attributes of a sandy soil and how they relate to total organic carbon. The study area is located in the municipality of Rio Branco do Ivaí - PR, in sandy soil under different uses, crop, pasture and native forest. The following were evaluated: particle size, pH, water-dispersed clay (WCD), dispersion index (DI), flocculation index (FI), organic matter (OM), total organic carbon (TOC), macro and microporosity, total porosity (TP), soil density (Ds), weighted mean diameter (WMD), geometric mean diameter (GMD) and aggregate stability index (ASI) at two depths of 0-10 and 10-20 cm. The experiment was carried out using a completely randomized design (CRD) among the three areas, with five replicates each, the data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and compared by the Tukey test (5%), principal component analysis (PCA) and Pearson correlation between the variables for each land use. Crop use favors compaction and affects the distribution relationship between macro and micropores in the soil. Pasture presented a higher total porosity value, indicating compaction, and aggregate stability increased in depth, due to the soil being less compacted in the 10-20 cm layer. Forest presented a good relationship between macro and micropores, lower soil density, and greater aggregate stability, reflecting an environment less affected by human intervention and agricultural machinery. TOC levels were lower in crop use, while pasture presented intermediate levels. These results indicated that pasture use affected physical attributes less than intensive crop use, which affected soil structure, producing less stable and smaller aggregates. TOC influences soil aggregation in different ways according to land use, which was evidenced by its correlation with physical attributes. In the forest, increased TOC promotes soil aggregation, increasing DMP, DMG, and IAE. In pastures, TOC is associated with increased macro and microporosity, PT, Ds and IF. And in crops, increased TOC favors DMG and ID. Total organic carbon content influenced aggregation in forest use and aeration in pasture use. It is concluded that land use affected soil physical quality and different uses alter soil stability and aggregation, with a greater negative impact on cropland use.

Keywords: soil structure, compaction, soil degradation, stability index, soil management.

5.3 INTRODUÇÃO

O solo pode atuar como um sumidouro de carbono, ajudando a reduzir a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Isso é fundamental para combater as mudanças climáticas, já que o aumento de CO₂ atmosférico contribui para o aquecimento global (Bayer et al., 2004). Além desse enorme prejuízo, essa mudança de uso do solo tem causado degradação especialmente em solos arenosos devido aos impactos do manejo nas características físicas.

A agropecuária brasileira enfrenta um de seus maiores desafios que é a degradação dos solos devido às práticas inadequadas de manejo (Barros et al., 2018). O uso do solo é um dos principais fatores que influenciam a qualidade física do solo, impactando diretamente na sua estrutura e funcionalidade. A alteração da cobertura vegetal original para diferentes práticas de manejo, como a agricultura e pastagens, provoca mudanças significativas nas propriedades físicas do solo (Fedele et al., 2018), que influenciam na perda de carbono orgânico total do solo.

O manejo influencia nas características físicas, como porosidade, argila dispersa em água, densidade, grau de compactação, estabilidade de agregados, que são essenciais para a compreensão da capacidade do solo em fornecer suporte estrutural, retenção de água e nutrientes, além de influenciar a aeração e o desenvolvimento radicular das plantas (Dexter, 2004; Rawls; Pachepsky, 2002; Hayes, 2017).

A qualidade física do solo pode variar amplamente com o uso do solo. Franco et al. (2020) observaram que áreas de lavoura apresentaram menores valores de macroporosidade e porosidade total, enquanto áreas de pastagem apresentaram valores intermediários. O manejo intensivo do solo em aumenta a densidade do solo devido à redução da matéria orgânica e à compactação oriunda do uso de maquinários agrícolas (Murty et al., 2002). Em contraste, áreas sob cobertura florestal preservada mantêm uma melhor estrutura, refletindo saúde e funcionalidade do solo.

Os solos arenosos apresentam diversas fragilidades que tornam o manejo e o seu uso desafiador, incluindo a baixa capacidade de retenção de água, a baixa fertilidade natural, a suscetibilidade à erosão e as dificuldades na manutenção da estrutura do solo. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar como os usos de lavoura, pastagem e floresta influenciam nos atributos físicos de um solo arenoso e como se relacionam com o carbono orgânico total.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada localiza-se no município de Rio Branco do Ivaí - PR (24°20'16,139" S e 51°18'17,957" W) com altitude média de 650 m, localizado na Região Norte Central Paranaense (IBGE, 2020). O clima é caracterizado como subtropical úmido Cfa, conforme a classificação de Köppen-Geiger com temperaturas médias de 20°C e precipitação média anual de 1650 mm (Alvares et al., 2013).

As áreas selecionadas para este estudo foram: 1) lavoura, culturas agrícolas temporárias com mais de 10 anos de plantio direto e sem rotação de culturas; 2) pastagem extensiva, com mais de 10 anos de pastejo e sem reforma; e 3) floresta nativa.

As coletas e análises do solo foram realizadas conforme o Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos (Embrapa, 2017). Para a caracterização e a avaliação física e química do solo, foram selecionados 5 pontos de coleta em cada área nas profundidades de: 0-10 cm e 10-20 cm. A granulometria e a argila dispersa em água foram realizadas pelo método da pipeta com agitação lenta, conforme a metodologia da Embrapa (2017) e o pH em CaCl₂ foi realizado de acordo com a metodologia de Teixeira et al. (2017)

A determinação da matéria orgânica foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Pavan et al. (1992a) e o carbono orgânico total pelo método Walkley-Black proposto por Fontana; Campos (2017).

A porosidade do solo (porosidade total, macro e microporosidade) foi determinada pelo método da mesa de tensão, descritos por Embrapa (2017). A densidade do solo (Ds) foi obtida através do método do anel volumétrico, segundo Embrapa (2017).

O Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) foram calculados de acordo com Kemper; Rosenau (1986), e o índice de estabilidade dos agregados do solo (IEA) foi determinado pela metodologia de Le Bissonais (1996) e calculado segundo Castro Filho et al. (1998).

O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento experimental inteiramente causalizado (DIC) entre as três áreas, com cinco repetições cada. Os dados foram comparados pelo teste ANOVA seguido de Tukey a 5% de probabilidade. Para ordenação dos dados utilizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) e a análise de correlação de Pearson entre a matéria orgânica e carbono orgânico total

e os atributos físicos, químicos e biológicos, entre as variáveis para cada uso do solo. A estatística foi realizada no software R (R Development Core Team, 2024).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A granulometria do solo é um componente fundamental das propriedades do solo que tem influência na capacidade de retenção de água, aeração, capacidade de drenagem e fertilidade. A granulometria para os tipos de uso do solo está apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Granulometria do solo para os usos de floresta, pastagem e lavoura nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tratamento	Argila		Silte		Areia
	g kg ⁻¹				
Profundidade 0-10 cm					
Floresta	200,0		220,6		579,4
Pastagem	146,4		82,4		771,2
Lavoura	54,6		49,6		895,8
Profundidade 10-20 cm					
Floresta	243,4		243,7		512,7
Pastagem	161,8		75,2		763,0
Lavoura	69,0		41,2		889,8

Na profundidade de 0-10 cm, o solo na floresta apresenta 200,0 g kg⁻¹ de argila, 220,6 g kg⁻¹ de silte e 579,4 g kg⁻¹ de areia, a pastagem apresenta 146,4 g kg⁻¹, o silte reduz para 82,4 g kg⁻¹, e a areia aumenta para 771,2 g kg⁻¹, na lavoura, a quantidade de argila cai para 54,6 g kg⁻¹, o silte é de 49,6 g kg⁻¹ e a areia atinge 895,8 g kg⁻¹ (tabela 1).

Na profundidade de 10-20 cm, o solo da floresta apresenta uma quantidade maior de argila, com 243,4 g kg⁻¹, o silte também aumenta para 243,7 g kg⁻¹, e a areia diminui para 512,7 g kg⁻¹, na pastagem, a argila é de 161,8 g kg⁻¹, o silte com 75,2 g kg⁻¹, e a areia com 763,0 g kg⁻¹, na lavoura, o solo continua com pouca argila, 69,0 g kg⁻¹, e silte, 41,2 g kg⁻¹, enquanto a areia permanece elevada, com 889,8 g kg⁻¹, mantendo o caráter arenoso em maior profundidade (tabela 1).

O teor de argila é mais alto na profundidade de 10-20 cm em comparação com a camada superior para todos os usos, isso é uma característica comum, pois a argila tende a se acumular em camadas mais profundas, devido ao processo de iluviação, que consiste na movimentação das partículas de solo de uma camada para outra, influenciados pela água que percola através do solo, carregando partículas finas de

argila (Buurman et al., 1998).

A floresta apresenta os maiores teores de argila e silte, em relação a pastagem e lavoura, em ambas as profundidades, o que já é esperado, pois a vegetação da floresta contribui para a formação de solos mais ricos em matéria orgânica, que melhora a estrutura do solo, favorecendo a agregação e reduzindo perda de partículas finas, como argila e silte, por lixiviação ou carreamento superficial, o que sugere que os solos da floresta apresentam uma maior capacidade de retenção de água e nutrientes em relação a pastagem e lavoura.

Observando a tabela 1, foi possível constatar que a proporção de areia é alta em todos os tratamentos, isso implica que esses solos apresentam uma boa drenagem, mas podem reter menos água e nutrientes do que os solos argilosos.

Na tabela 2 são apresentados os valores de pH, argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão (ID) e índice de floculação (IF), para os usos de floresta, pastagem e lavoura nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tabela 2. Valores do pH, argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão (ID) e índice de floculação (IF), para os usos de floresta, pastagem e lavoura nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tratamento	pH ⁽¹⁾ CaCl ₂	ADA ⁽²⁾ %	ID ⁽³⁾ %	IF ⁽⁴⁾ %
Profundidade 0-10 cm				
Floresta	4,22b*	12,4a	62,00ab	38,00ab
Pastagem	4,48a	7,5b	51,23b	48,77a
Lavoura	4,06b	4,1c	75,09a	24,91b
CV (%)	2,943	20,86	16,32	27,71
p-valor	0,001	0,001	0,146	0,146
Profundidade 10-20 cm				
Floresta	4,12b	13,8a	56,70a	43,30a
Pastagem	4,56a	9,9b	61,19a	38,81a
Lavoura	4,12b	3,8c	55,07a	44,93a
CV (%)	3,086	9,60	11,30	15,38
p-valor	p<0,001	p<0,001	0,886	0,886

¹ Potencial hidrogeniônico (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹). ² Argila dispersa em água (%). ³ Índice de dispersão (%). ⁴ Índice de floculação (%). *Valores seguidos da mesma letra minúscula na vertical, para a mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Segundo a tabela 2, observa-se o pH e os valores identificam solo ácido em todos os tratamentos. Os valores encontrados da ADA e ID sofrem influência do pH ácido, pois a dispersão da argila relaciona-se com a interação das cargas elétricas do solo e essas cargas variáveis dependem do pH, e o meio ácido favorece a sua dispersão em água.

A dispersão da argila em água pode ocorrer de forma natural ou por ação antrópica e depende das características físicas e pH do solo. Van Lier (2010) destaca que o pH influencia na dispersão do solo através da interação das cargas elétricas nas superfícies dos coloides do solo e Pavan et al. (1992b) afirma que solos com pH menor que 7,0 tem ação dispersante, o que corrobora com os resultados encontrados, indicando que o pH da floresta e lavoura influenciaram nos valores de ID, na profundidade de 0-10 cm, juntamente com os teores de argila encontrados em cada uso.

Na tabela 2, observa-se que para a profundidade de 0-10 cm, a floresta apresentou o maior valor de ADA (12,4%), seguida pela pastagem (7,5%) e lavoura (4,1%), e que os valores diferiram estatisticamente entre si. Esses valores podem ser comparados aos teores de argila em cada tratamento (tabela 1), onde observa-se que o solo na floresta apresenta 200,0 g kg⁻¹ de argila, a pastagem apresenta 146,4 g kg⁻¹ e na lavoura, a quantidade de argila cai para 54,6 g kg⁻¹, o que pode explicar a floresta apresentar maior valor de ADA em decorrência do seu maior teor de argila.

Na profundidade de 10-20 cm, o teor de argila é de 243,4 g kg⁻¹ na floresta, 161,8 g kg⁻¹ na pastagem e 69,0 g kg⁻¹ na lavoura (tabela 1), mantendo a tendência de a lavoura apresentar menor teor de argila e conseqüentemente, menor valor de ADA. Nessa profundidade, a ADA também se diferenciou estatisticamente entre os tratamentos.

Os maiores teores de argila encontrados na floresta podem ser devido ao carreamento das partículas finas oriundas da lavoura e pastagem, pois os usos do solo se encontram em toposequência e o relevo da lavoura é ondulado (declividade média de 9%) e da pastagem é suave ondulado (declividade média de 6%), o que favorece o carreamento das partículas de argila para as áreas mais baixas, nesse caso, a área de floresta. E isso justifica a floresta apresentar maiores valores de ADA, pois as partículas de argila que sofrem carreamento e são depositadas apresentam dificuldade de agregação e são mais propensas a dispersão.

Castione et al. (2015) destaca que o carreamento de solo, principalmente das partículas finas tende a ser em direção a corpos d'água. E a floresta é uma área de preservação permanente de mata ciliar do rio Rio Branco.

Miqueloni; Bueno (2011) também observaram que as partículas de argila são carreadas para as áreas de menor cota, e Sanches et al. (2009) relata que o relevo apresenta relação entre os atributos físicos, devido ao transporte e carreamento de

partículas do solo, o que justifica os maiores valores de ADA terem sido encontrados na área mais baixa, a floresta.

Solos com altos valores de ADA são mais susceptíveis a erosão e apresentam fragilidades na qualidade física e estrutura do solo, como a redução da porosidade total e o comprometimento da estabilidade dos agregados (Mota et al., 2015).

Segundo Corrêa et al. (2009) o índice de floculação está relacionado ao teor de argila e matéria orgânica, os quais desempenham o papel de agentes cimentantes, promovendo a união das partículas do solo, que favorecem a floculação das partículas minerais e a agregação.

O ID e o IF não se diferenciaram estatisticamente entre floresta e pastagem e entre floresta e lavoura, na profundidade de 0-10 e não se diferenciaram estatisticamente na profundidade de 10-20 cm, indicando que apesar da ADA na floresta ter sido maior, não houve diferenças entre o ID e IF da floresta e pastagem e da floresta e lavoura (profundidade 0-10 cm), o que indica que a matéria orgânica presente no solo de floresta atua como agente cimentante contribuindo para um solo mais estável e menos suscetível a erosão. De acordo com Prado; Natale (2003), nas camadas superficiais, a matéria orgânica contribui para o aumento IF, melhorando sua estrutura e capacidade de agregação.

Com os baixos teores de matéria orgânica, a dispersão do solo é favorecida (Wendling et al., 2012), e isso é observado nos dados, pois o ID na lavoura na profundidade de 0-10 cm é de 75,09%, não diferindo estatisticamente da floresta, com 62%, apesar da ADA diferir estatisticamente entre eles.

A ADA na floresta, na profundidade de 10-20 cm, apesar de ter sido maior e com diferenças significativas, as diferenças de ID e IF não foi significativa entre os tratamentos. Ferreira et al. (2018) relatam que a presença de raízes e a menor mobilização do solo ao longo do tempo, contribuem para a redução do processo de desagregação, preservando a estrutura do solo e aumentando sua capacidade produtiva.

O ID reduziu em profundidade e o IF aumentou em profundidade para a floresta e lavoura, o que pode estar associado à presença de elementos floculantes no solo, como Al^{3+} e H^+ (Gasparetto et al., 2007).

Na tabela 3 são apresentados os valores de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), para os usos de floresta, pastagem e lavoura, em duas camadas de profundidade (0-10 cm e 10-20 cm).

Tabela 3. Teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tratamento	MO ⁽¹⁾ g kg ⁻¹	COT ⁽²⁾ g kg ⁻¹
Profundidade 0-10 cm		
Floresta	26,51a*	15,38a
Pastagem	18,03b	10,46b
Lavoura	8,63c	5,01c
CV (%)	11,63	11,63
p-valor	p<0,001	p<0,001
Profundidade 10-20 cm		
Floresta	24,03a	13,94a
Pastagem	16,77b	9,73b
Lavoura	8,17c	4,74c
CV (%)	2,79	2,79
p-valor	p<0,001	p<0,001

¹ Matéria orgânica do solo (g kg⁻¹). ² Carbono orgânico total (g kg⁻¹). *Valores seguidos da mesma letra minúscula na vertical, para a mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Comparando os dados de ADA (tabela 2) e o teor de MO (tabela 3), a ADA aumenta em profundidade para a floresta e pastagem, e a MO reduz em profundidade, o que pode ser justificado, pois, a MO contribui com a floculação do solo (Prado; Centurion, 2001). No caso da lavoura, a ADA reduziu em profundidade e a MO também reduziu, o que pode ser explicado pois na lavoura o teor de MO é baixo, tendo menor influência na ADA.

A MO e o COT são caracterizados como altos, médios e baixos, na profundidade de 0-10 cm, e como médios, médios e baixos, na profundidade de 10-20 cm, para os usos de floresta, pastagem e lavoura, respectivamente, segundo a caracterização de Pauletti; Motta, 2017.

O manejo intensivo de lavouras pode reduzir significativamente os valores de MO e COT, devido à sua decomposição acelerada e à menor entrada de resíduos vegetais (Costa et al., 2013). O COT é um importante indicador da saúde do solo, refletindo a quantidade de MO e a capacidade do solo de fornecer nutrientes, armazenar água e sustentar a biodiversidade microbiana (Lal, 2004).

Os resultados mostraram que o manejo do solo impacta nos níveis de MO e COT, e que o manejo intensivo da lavoura teve um impacto negativo mais acentuado. O estudo de Van Straaten et al. (2015) observou que o manejo intensivo de áreas agrícolas, sem adição de resíduos vegetais e MO, resultou em uma perda de até 50% do COT em comparação com as florestas nativas. Os resultados encontrados indicam que a área de lavoura resultou em uma perda de 67,42%, enquanto da floresta para pastagem em 31,98%, na profundidade de 0-10 cm, considerando o valor de COT

atual na floresta.

A qualidade física do solo é essencial para o crescimento das raízes, e os aspectos como a porosidade, densidade, agregação, e estabilidade podem direcionar práticas adequadas para o bom desenvolvimento das culturas (Lapaz et al., 2019).

Na tabela 4 são apresentados os valores de macroporosidade, microporosidade, porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds), para os usos de floresta, pastagem e lavoura, em duas camadas de profundidade (0-10 cm e 10-20 cm), e a relação da porcentagem da distribuição da macro e microporosidade em relação a porosidade total está entre parênteses.

Tabela 4. Valores da macroporosidade (macro), microporosidade (micro), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 m.

Tratamento	Macro ⁽¹⁾ cm ³ cm ⁻³	Micro ⁽²⁾ cm ³ cm ⁻³	PT ⁽³⁾ cm ³ cm ⁻³	Ds ⁽⁴⁾ g cm ⁻³
Profundidade 0-10 cm				
Floresta	0,143a* (35,92%)	0,254b (64,08%)	0,398ab	1,246c
Pastagem	0,092a (21,10%)	0,343a (78,90%)	0,436a	1,391b
Lavoura	0,162a (46,82%)	0,184c (53,18%)	0,346b	1,534a
CV (%)	15,81	13,12	10,05	5,59
p-valor	0,053	p<0,001	0,012	p<0,001
Profundidade 10-20 cm				
Floresta	0,147a (34,26%)	0,282a (65,74%)	0,429a	1,391b
Pastagem	0,062c (16,23%)	0,320a (83,77%)	0,382a	1,580ab
Lavoura	0,091b (30,23%)	0,210b (69,77%)	0,301b	1,633a
CV (%)	6,14	9,65	10,92	4,32
p-valor	0,017	p<0,001	0,001	0,027

¹ Macroporosidade (cm³ cm⁻³). ² Microporosidade (cm³ cm⁻³). ³ Porosidade total (cm³ cm⁻³). ⁴ Densidade do solo (g cm⁻³). *Valores seguidos da mesma letra na vertical, para a mesma profundidade, não difere entre si pelo teste de Tukey (5 %). As porcentagens que estão entre parênteses referem-se à relação da distribuição da macro e microporosidade em relação a porosidade total.

Os resultados dos atributos físicos do solo apresentados na tabela 4, demonstraram a variação da macroporosidade e microporosidade do solo sob diferentes tipos de uso, floresta, pastagem e lavoura, em duas camadas de profundidade, 0-10 cm e 10-20 cm, e essas variações são influenciadas pelo manejo do solo.

A macroporosidade é crucial para a infiltração e aeração do solo, influenciando a disponibilidade de água e a respiração das raízes. Na camada de 0-10 cm, a macroporosidade para os três usos não diferiram estatisticamente. Na camada de 10-20 cm, a macroporosidade foi maior na floresta (0,147 cm³ cm⁻³), seguida pela lavoura (0,091 cm³ cm⁻³) e, por último, pela pastagem (0,062 cm³ cm⁻³), sendo que os valores

se diferenciaram estatisticamente entre si. A maior macroporosidade na floresta pode ser atribuída à ausência de compactação do solo, presença de raízes e matéria orgânica. Em pastagens, o pisoteio dos animais frequentemente reduz a macroporosidade, especialmente em camadas mais profundas.

O solo ideal para a produção agrícola deve apresentar uma distribuição percentual de 34% para macroporos e 66% para microporos. A floresta foi o tratamento que apresentou a distribuição percentual de macro e microporos mais próxima ao ideal entre os tratamentos, com 35,92% e 64,08%, e 34,26% e 65,74% (tabela 4), para macroporosidade e microporosidade, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. A relação porcentual de macro e microporos para a pastagem e lavoura não apresentou uma distribuição adequada.

Para os valores de microporosidade, na camada de 0-10 cm os usos diferiram estatisticamente entre si, sendo a pastagem apresentando a maior microporosidade ($0,343 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), seguida pela floresta ($0,254 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e lavoura ($0,184 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (tabela 4). A microporosidade é importante para a retenção de água no solo, afetando a disponibilidade de água para as plantas, e a alta microporosidade em pastagens pode estar associada ao acúmulo de matéria orgânica e raízes finas que aumentam os poros menores.

Na camada de 10-20 cm, para a microporosidade, tanto a floresta quanto a pastagem apresentam valores que não diferiram estatisticamente, ambos maiores que na lavoura, isso indica que em usos do solo como floresta, há uma melhor estruturação do solo nas camadas mais profundas, mantendo a capacidade de retenção de água, e no uso como pastagem, apesar de não diferir estatisticamente da floresta, observa-se que a relação entre macro e microporos está prejudicada.

Segundo Ahammad et al. (2019) a cobertura florestal tende a manter a estrutura do solo, favorecendo tanto a macroporosidade quanto a microporosidade, devido ao aporte contínuo de matéria orgânica e à atividade biológica intensa. Em contraste, solos de pastagens frequentemente sofrem compactação devido ao pisoteio, o que pode reduzir a macroporosidade em profundidade, como observado nos resultados.

Em sistemas de lavoura, práticas agrícolas intensivas podem levar à compactação do solo em profundidade, diminuindo a macroporosidade nas camadas mais profundas (Hamza; Anderson, 2005), o que justifica na lavoura, em profundidade, a macroporosidade diminuir e a microporosidade aumentar.

A pastagem apresentou o maior valor de porosidade total (PT) na camada

superficial ($0,436 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e não diferiu estatisticamente da floresta, isso pode ser explicado pelo efeito positivo da cobertura vegetal e presença de raízes. A floresta apresentou valor de porosidade de $0,398 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, que pode ser atribuído à presença de matéria orgânica, raízes finas e alta atividade biológica, que contribuem para uma boa estrutura do solo. A PT na lavoura não diferiu estatisticamente da floresta, e diferiu estatisticamente da pastagem.

Na camada de 10-20 cm, a PT na floresta e pastagem não diferiram estatisticamente. A floresta apresentou um aumento na PT em profundidade ($0,429 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), refletindo uma estrutura do solo bem preservada e menos sujeita à compactação devido à ausência de manejo intensivo e a pastagem e lavoura apresentaram uma redução na PT em relação à camada superficial. A redução da PT da pastagem ($0,382 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) pode ser explicada pela ação contínua do pisoteio dos animais. O uso com lavoura continuou a apresentar a menor PT entre os tratamentos mesmo na camada de 10-20 cm ($0,301 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), indicando compactação, o que é consistente com práticas agrícolas intensas, que compactam o solo, especialmente se não há rotação de culturas ou incorporação de matéria orgânica.

Os valores de PT mostraram como o manejo do solo impacta na qualidade física. A porosidade total é a combinação de ambas as porosidades e desempenha um papel significativo na fertilidade do solo, impactando as interações entre drenagem, absorção de nutrientes, crescimento das raízes, aeração e temperatura (Letey, 1985). Esses fatores estão diretamente ligados ao desenvolvimento e a produtividade das culturas.

A textura do solo influencia diretamente na porosidade do solo. Segundo estudo de Kiehl (1979), o solo ideal para a produção agrícola deve apresentar porosidade total próxima a $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

A PT observada na floresta pode ser atribuída ao alto teor de matéria orgânica e à diversidade biológica, que promovem a formação de agregados estáveis e a criação de poros maiores (Barral et al., 1998). A pastagem tende a sofrer compactação em camadas mais profundas devido ao pisoteio dos animais, o que pode ser observado pela distribuição percentual de macro e microporos, com 21,10% e 78,90%, e 16,23% e 83,77%, para macroporosidade e microporosidade, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. A relação de distribuição percentual de macro e microporos encontrada na pastagem, indica um solo compactado em profundidade.

Solos compactados são mais susceptíveis a erosão e possuem menor

capacidade de retenção de água e nutrientes, e devido ao menor espaço poroso (Peixoto et al., 2020).

Baver et al. (1972) afirmaram que, para que haja desenvolvimento satisfatório de sistemas radiculares, a macroporosidade deve estar em torno de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A distribuição de poros também é importante, com solos arenosos frequentemente exibindo uma maior proporção de macroporos ($\geq 50 \mu\text{m}$) e uma menor proporção de microporos ($\leq 30 \mu\text{m}$), o que favorece a drenagem rápida e aeração (Hamamoto et al., 2009).

A densidade do solo (D_s) nas duas profundidades, foi maior na lavoura e menor na floresta, com a pastagem apresentando valores intermediários (tabela 4), estes resultados mostram que houve impacto do uso do solo sobre a D_s . O manejo intensivo da lavoura corroborou para o aumento na D_s , tanto na camada superficial quanto na subsuperficial, esse aumento é atribuído ao tráfego de máquinas agrícolas e à compactação causada por práticas de cultivo intenso. Estudos como os de Jha et al. (2010) e Murty et al. (2002) corroboram com os resultados encontrados nesse estudo, mostrando que áreas agrícolas tiveram aumento da D_s devido à redução da matéria orgânica e à compactação mecânica.

A D_s na área da lavoura, pode ser considerada alta, uma vez que solos arenosos têm a capacidade de restringir o desenvolvimento do sistema radicular das plantas quando sua densidade ultrapassa $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ (Reichert et al., 2003). Em geral, os solos arenosos possuem valores de D_s superiores dos valores encontrados nos solos argilosos (Bueno; Vilar, 1998). Para um solo arenoso (320 g kg^{-1} argila), Klein (2008) encontrou D_s de $1,77 \text{ mg m}^{-3}$. Segundo Kiehl (1979), a D_s se situa no intervalo de $1,1$ a $1,6 \text{ mg m}^{-3}$ em solos minerais e assume valores superiores a $1,6 \text{ mg m}^{-3}$ em solos arenosos. Torres; Saraiva (1999) observaram valores de D_s de $1,25$ a $1,70 \text{ mg m}^{-3}$ para solos arenosos, em áreas com floresta e compactadas respectivamente. O valor da D_s $1,55 \text{ mg m}^{-3}$ é considerado crítico para solos franco-argilosos a argilosos (Camargo; Alleoni, 1997). Beutler et al. (2005) afirmaram que a densidade ótima para o cultivo da soja é de $1,23 \text{ mg m}^{-3}$ para solos franco-argilo-arenosos. Segundo Bowen (1981), a D_s crítica para solos arenosos é de $1,85 \text{ mg m}^{-3}$. Para Reichert et al. (2003) a D_s variou entre $1,70$ e $1,80 \text{ mg m}^{-3}$ para um solo arenoso.

Novak et al. (2017) ressalta que os parâmetros de D_s desempenham um papel significativo na avaliação da qualidade física do solo. A camada superficial geralmente tem menor D_s em comparação com a camada subsuperficial, isso pode ser devido à

maior presença de matéria orgânica e atividade biológica na camada superficial. Don et al. (2011) mostram que práticas agrícolas afetam mais a camada superficial do que as camadas mais profundas.

A Ds na pastagem foi maior que na floresta, mas menor que na lavoura, na profundidade de 0-10 cm, o que pode ser explicado pois o uso do solo com pastagem pode apresentar compactação devido ao pisoteio dos animais. O manejo adotado na área de pastagem foi o sistema extensivo com poucas cabeças de gado na área, sendo aplicado 1 a 2 cabeças de gado por hectare, o que explica os menores valores de Ds comparados a lavoura.

Mesmo que a Ds esteja abaixo do limite crítico, a compactação pode afetar a agregação e estrutura do solo. A Ds na pastagem foi menor na profundidade superficial do que em relação a profundidade de 10-20 cm, o que pode ser explicado pela presença de raiz nessa camada. Reinert et al. (2008) ressalta que as densidades do solo mais baixas podem ser atribuídas à presença de raízes, e ao teor de matéria orgânica do solo. Estudos mostram que o manejo inadequado das pastagens pode aumentar a Ds, mas os impactos variam dependendo da intensidade do uso da pastagem (Toohey et al., 2018), e dependendo do manejo da pastagem pode aumentar a compactação do solo (Islam; Weil, 2000).

Assim como o aumento da Ds, a lavoura resultou em um aumento significativo na compactação do solo, tanto na camada superficial quanto na profundidade de 10-20 cm. O manejo empregado na área da lavoura aumentou a compactação do solo devido à redução da matéria orgânica e à compactação mecânica (Batey, 2009; Geissen et al., 2009).

A Ds foi superior na lavoura nas duas profundidades analisadas, e Ferreira et al. (2020) destaca que a compactação do solo é mais comum no plantio direto devido à presença frequente de maquinário agrícola, isso pode ter implicações negativas para as produtividades agrícolas, pois solos compactados apresentam menor infiltração de água e maior escoamento superficial e conseqüentemente maior erosão. Para mitigar esses efeitos, práticas de manejo sustentável, como a rotação de culturas, a adição de matéria orgânica e a redução do tráfego de máquinas agrícolas são recomendadas.

A Ds apresentou aumento em profundidade para os usos do solo analisados, o que também foi observado por Ferreira et al. (2018).

A tabela 5 apresenta os valores do diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas

profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, para os usos do solo de floresta, pastagem e lavoura.

Tabela 5. Valores do diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tratamento	DMP ⁽¹⁾ mm	DMG ⁽²⁾ mm	IEA ⁽³⁾ %
Profundidade 0-10 cm			
Floresta	7,06ab*	2,09a	61,75a
Pastagem	8,14a	2,45a	44,22a
Lavoura	5,35b	2,08a	44,79a
CV (%)	18,0	13,1	22,4
p-valor	0,012	0,115	0,049
Profundidade 10-20 cm			
Floresta	8,88a	2,47a	76,95a
Pastagem	9,32a	2,63a	74,76a
Lavoura	5,53b	1,98b	50,57b
CV (%)	16,8	11,3	14,2
p-valor	0,001	0,007	0,002

¹ Diâmetro médio ponderado (mm). ² Diâmetro médio geométrico (mm). ³ Índice de estabilidade de agregados (%). *Valores seguidos da mesma letra minúscula na vertical, para a mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Os parâmetros físicos apresentados na tabela 5 são importantes indicadores da qualidade estrutural do solo. O DMP reflete o tamanho médio dos agregados do solo, ajustado pela massa de cada fração. Six et al. (2000) ressalta que valores mais altos de DMP sugerem agregados maiores, indicando melhor agregação, estrutura, porosidade e infiltração de água do solo.

O DMG mede o tamanho médio dos agregados do solo considerando sua distribuição geométrica, servindo como indicador da estrutura do solo (Bronick; Lal, 2005), com ele pode-se identificar o maior diâmetro médio encontrado, e quanto maior o DMG, maior o tamanho do agregado e maior resistência a erosão.

O IEA está relacionado à capacidade do solo de resistir à erosão, à compactação e à perda de nutrientes, e influencia a agregação, estrutura, atividade microbiana e capacidade de retenção de água e nutrientes. Tisdall; Oades (1982) indicam que o IEA é um percentual que demonstra a capacidade dos agregados do solo de resistir à desagregação pela água, onde valores mais altos significam maior estabilidade, contribuindo para menor erosão e menor escoamento superficial do solo.

Solos com alta estabilidade de agregados apresentam melhor capacidade de infiltração de água, maior resistência à erosão e maior capacidade de suportar a

produção agrícola de maneira sustentável (Willy et al., 2019).

De acordo com a tabela 5, na camada de 0-10 cm, os valores de DMG e IEA não diferiram estatisticamente entre os usos, apenas o DMP apresentou diferença entre pastagem e lavoura. Embora os usos do solo não apresentarem diferença estatística dos valores de IEA na camada de 0-10 cm, em valores absolutos a área da floresta mostrou maiores valores de IEA de 61,75%, seguido pelos valores de lavoura e pastagem, 44,79 e 44,22%, respectivamente.

O maior IEA da floresta e pastagem, na profundidade de 10-20 cm, sugere que a cobertura florestal contribui para a formação e manutenção de agregados estáveis, o que está de acordo com estudos que mostram que solos florestais tendem a ter melhor agregação e estabilidade devido ao maior aporte de matéria orgânica e menor distúrbio físico (Jha et al., 2010). A presença de vegetação densa e a decomposição contínua da matéria orgânica promovem a formação e estabilidade dos agregados do solo. Martínez-Trinidad et al. (2012) identificaram que florestas tropicais secas exibem alta estabilidade de agregados devido ao maior volume de raízes e carbono orgânico.

A pastagem apresentou valor de DMP superior a lavoura, na profundidade de 0-10 cm, e a floresta e a pastagem apresentaram valores de DMP e DMG superiores a lavoura, na profundidade de 10-20 cm, o que indica presença de agregados maiores na floresta e pastagem. E que em profundidade, a pastagem apesar de apresentar alta microporosidade, o que sugere compactação, apresenta resistência a desagregação em água, sugerindo que o uso do solo na pastagem, afetou menos fisicamente o solo do que na lavoura.

A atividade de pastoreio pode compactar o solo e reduzir a porosidade, mas a presença de raízes e a ciclagem de nutrientes ainda podem ajudar a manter uma estrutura relativamente estável (Islam; Weil, 2000). Coberturas vegetais permanentes, como florestas e pastagens bem manejadas, têm se mostrado eficazes na manutenção da estrutura do solo, aumentando a matéria orgânica e promovendo uma maior estabilidade dos agregados (Conant et al., 2004). Emadodin et al. (2009) observaram que solos sob uso agrícola têm menor estabilidade de agregados comparado com solos florestais, mas pastagens podem manter uma estabilidade aceitável devido às práticas de manejo que preservam a estrutura do solo.

Na profundidade de 10-20 cm, a lavoura apresentou os menores valores de DMP e DMG, indicando maior degradação da estrutura física do solo. Para Geissen et al. (2009), o uso intensivo do solo agrícola, incluindo o preparo do solo e a colheita

mecanizada, pode levar a quebra de agregados e a compactação do solo, resultando em menor agregação. Essa afirmação vai ao encontro dos resultados encontrados nesse estudo que mostraram uma maior compactação na área agrícola (tabela 4) e menores valores de IEA na lavoura na profundidade de 10-20 cm (tabela 5), o que é justificado pela utilização de maquinários agrícolas, devido ao efeito pé de grade, impactando também as camadas abaixo de 10 cm de profundidade.

O uso e manejo da lavoura degradou significativamente a estabilidade dos agregados do solo, enquanto a área de pastagem apresentou uma condição intermediária. Práticas agrícolas intensivas, como as utilizadas nessa área resultaram em compactação do solo, diminuição da porosidade e conseqüentemente na redução da estabilidade dos agregados. A compactação pode reduzir a infiltração de água e aumentar o escoamento superficial, contribuindo com a erosão e degradação da qualidade do solo (Batey, 2009).

Estudos como os de Abrishamkesh et al. (2011) mostram que práticas agrícolas intensivas reduzem a estabilidade dos agregados devido à desintegração de grandes agregados em menores, resultando em menor proporção de agregados estáveis. As áreas cultivadas com lavoura apresentam menores valores de IEA devido ao preparo do solo intensivo, pois o preparo do solo e outras práticas agrícolas quebram os agregados, reduzindo a estabilidade e agregação do solo.

Além disso, a remoção de resíduos de colheitas e a falta de cobertura vegetal constante diminuem o teor de matéria orgânica, essencial para a estabilidade dos agregados. O uso excessivo e inadequado de máquinas agrícolas pode compactar o solo, reduzindo a porosidade e afetando negativamente a estrutura dos agregados. As práticas de manejo do solo que visam a conservação ou restauração da cobertura vegetal nativa contribuem para a manutenção da saúde do solo (Lal, 2015), minimizando a erosão e melhorando a infiltração de água (Pimentel et al., 1995).

A área de floresta recebe interferências dos animais que estão presentes na área de pastagem e sofre supressão vegetal natural nas bordas. Vale ressaltar que no rio Rio Branco, que passa pela área floresta, ocorre extração de areia para uso comercial, que afeta a sua qualidade ambiental, o que pode justificar os resultados encontrados, onde a floresta indica sinais de perturbação ambiental.

A área de pastagem recebeu apenas uma reforma, a qual foi realizada há mais de 10 anos, sem nenhuma adubação química ou correção do solo, foram realizadas apenas operações mecânicas de revolvimento do solo, que consistiram em gradagem

do solo, semeadura a lanço e incorporação das sementes no solo. A capina manual é usada para controle de plantas invasoras. O manejo empregado na pastagem justifica os resultados encontrados, pois apesar da baixa taxa de lotação de animais por hectare na área, a ausência de correção do solo e reforma influenciam na compactação.

A área de lavoura é cultivada com sucessão de culturas de soja e milho ou aveia, dependendo do tempo de colheita da soja, com preferência para o milho, com adubação em linha e sem adubação de cobertura, para a recomendação de adubação não é realizada análise química do solo, com predominância de uso de NPK. Não é realizado o período de pousio na área. A calagem é feita há cada 10 anos aproximadamente, sendo que a quantidade a ser aplicada é determinada pela análise química do solo, que é feita a partir de uma amostra composta de três pontos da área. A última aplicação de calagem foi realizada há aproximadamente 8 anos. É utilizado a grade para revolvimento do solo e controle de plantas daninhas. O manejo intensivo da lavoura afeta a qualidade física do solo nesse uso, justificando os resultados encontrados de compactação e baixa estabilidade de agregados.

A análise de PCA para os atributos físicos e os usos do solo, na profundidade de 0-10 cm é apresentada na figura 13.

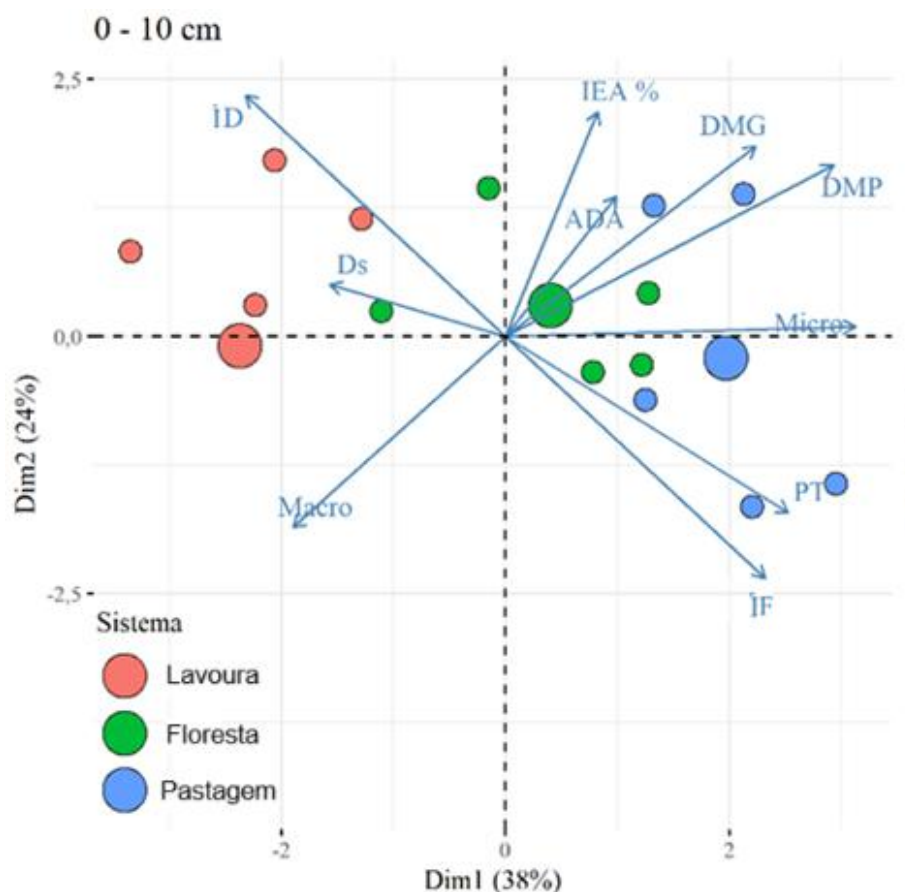


Figura 13. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos físicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm.

Sendo: DMP: Diâmetro médio ponderado. DMG: Diâmetro médio geométrico. IEA: Índice de estabilidade de agregados. Macro: Macroporosidade. Micro: Microporosidade. PT: Porosidade total. Ds: Densidade do solo. ADA: Argila dispersa em água. ID: Índice de dispersão. IF: Índice de floculação. Vermelha indica lavoura, verde indica floresta e azul indica pastagem.

Na análise de PCA, na profundidade de 0-10 cm, o primeiro eixo explicou 38% e o segundo eixo 24%, totalizando 62% da variância total dos dados.

Na profundidade de 0-10 cm, o DMP, DMG e IEA estão associados entre si tanto para a floresta quanto para a pastagem, isto é, existe uma correlação linear. E para a lavoura, houve uma menor correlação dessas variáveis, e maior potencial de correlação positiva com o ID, e menor com o IF e PT, indicando que solos compactados podem sofrer perdas de solo por processo de erosão.

A macroporosidade está oposta ao DMP, DMG e IEA em relação a floresta e pastagem, o que pode ocorrer devido ao solo ser arenoso, o que geralmente representa solos com menor estabilidade de agregados.

O IEA teve potencial de correlação positiva moderada com a floresta, o que é observado nos dados, pois mesmo com os valores entre os usos não terem se

diferenciado estatisticamente, os valores absolutos da floresta foram superiores, o que pode ser explicado pela presença de raízes, matéria orgânica e atividade microbiana, e conseqüentemente, apresenta melhor desenvolvimento das raízes e menor suscetibilidade a erosão. De acordo com Bronick; Lal (2005) a estrutura influencia na retenção de água do solo, erosão e no desenvolvimento das raízes.

A pastagem está intercorrelacionada com a PT, microporosidade, o que se justifica pela compactação causada pelo pisoteio dos animais, e com o DMP e DMG, devido ao maior tamanho de agregados observados, que corroboram com a associação negativa em relação a macroporosidade, e a floresta apresenta potencial de correlação positiva com a ADA e Ds, o que é esperado devido a presença de matéria orgânica. A floresta está no centro da ordenação, indicando que as variáveis estão mais dissociadas entre si.

A análise de PCA para os atributos físicos e os usos do solo, na profundidade de 10-20 cm é apresentada na figura 14.

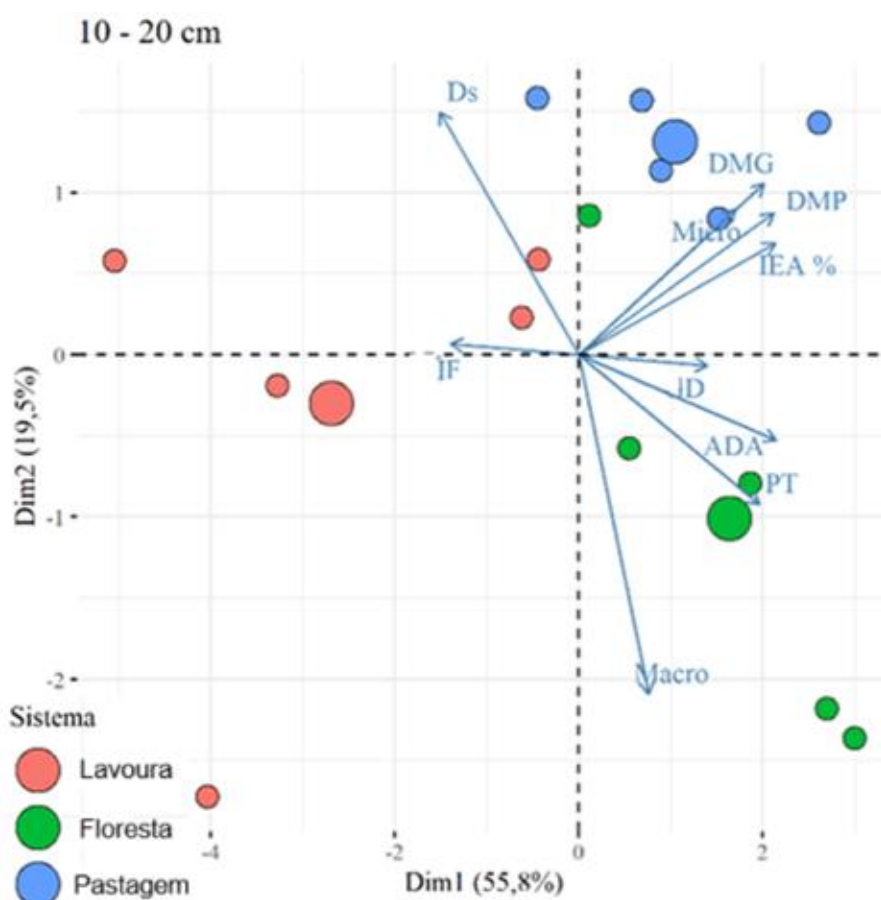


Figura 14. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos físicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 10-20 cm. Sendo: DMP: Diâmetro médio ponderado. DMG: Diâmetro médio geométrico. IEA: Índice de

estabilidade de agregados. Macro: Macroporosidade. Micro: Microporosidade. PT: Porosidade total. Ds: Densidade do solo. ADA: Argila dispersa em água. ID: Índice de dispersão. IF: Índice de floculação. Vermelha indica lavoura, verde indica floresta e azul indica pastagem.

Na análise de PCA, na profundidade de 10-20 cm, o primeiro eixo explicou 55,8% e o segundo eixo 19,5%, totalizando 75,3% da variância total dos dados.

Na profundidade de 10-20 cm, foram observadas variáveis linearmente correlacionadas ao solo da lavoura com o IF, o que se justifica, pois, em profundidade, a formação de agregados é favorecida pelo plantio direto e cobertura do solo.

A ADA, PT e macroporosidade apresentam uma influência dessas variáveis na floresta e que varia de acordo com a profundidade, o que indica um solo menos compactado e menos suscetível a erosão.

O DMP, DMG e IEA estão associados entre si para a pastagem, isto é, há uma correlação linear. Para a pastagem, o DMP, DMG e microporosidade, estão associados de certa forma entre si que indicam impacto na qualidade física do solo, que reflete compactação e afeta a estrutura e qualidade física do solo, o que é corroborado pelos dados encontrados que mostram uma relação da distribuição de macro e microporos desigual, apresentando 16,23% e 83,76%, respectivamente.

O DMP, DMG e IEA e microporosidade estão intercorrelacionados positivamente entre si, tanto para a floresta quanto para a pastagem, indicando melhor agregação e estrutura nesses usos, devido a presença de raízes e matéria orgânica.

A Ds para este estudo na profundidade de 10-20 cm não foi perceptível influência nas variáveis físicas do solo.

Comparando as duas profundidades, houve uma diferença de associação das variáveis observadas de acordo com a profundidade, para cada sistema utilizado. Os usos do solo afetam a estrutura do solo de maneira diferente em cada profundidade. A ausência de estrutura é uma degradação do solo (Chan; Heenan, 1996) e está relacionada ao uso do solo e ao manejo adotado.

Analisando as figuras 13 e 14, pode-se observar que os diferentes tipos de uso do solo têm impactos significativos nos atributos físicos. Compreender os impactos do manejo do solo nos atributos físicos é crucial para desenvolver práticas que mantenham a produtividade e a saúde do solo. A melhoria dos atributos físicos, como a estabilidade dos agregados e a porosidade, pode diminuir a erosão e aumentar a retenção de água (Moratelli et al., 2023).

A figura 15 apresenta a correlação de Pearson para os atributos físicos no uso da floresta que tiveram correlação acima de 0,65.

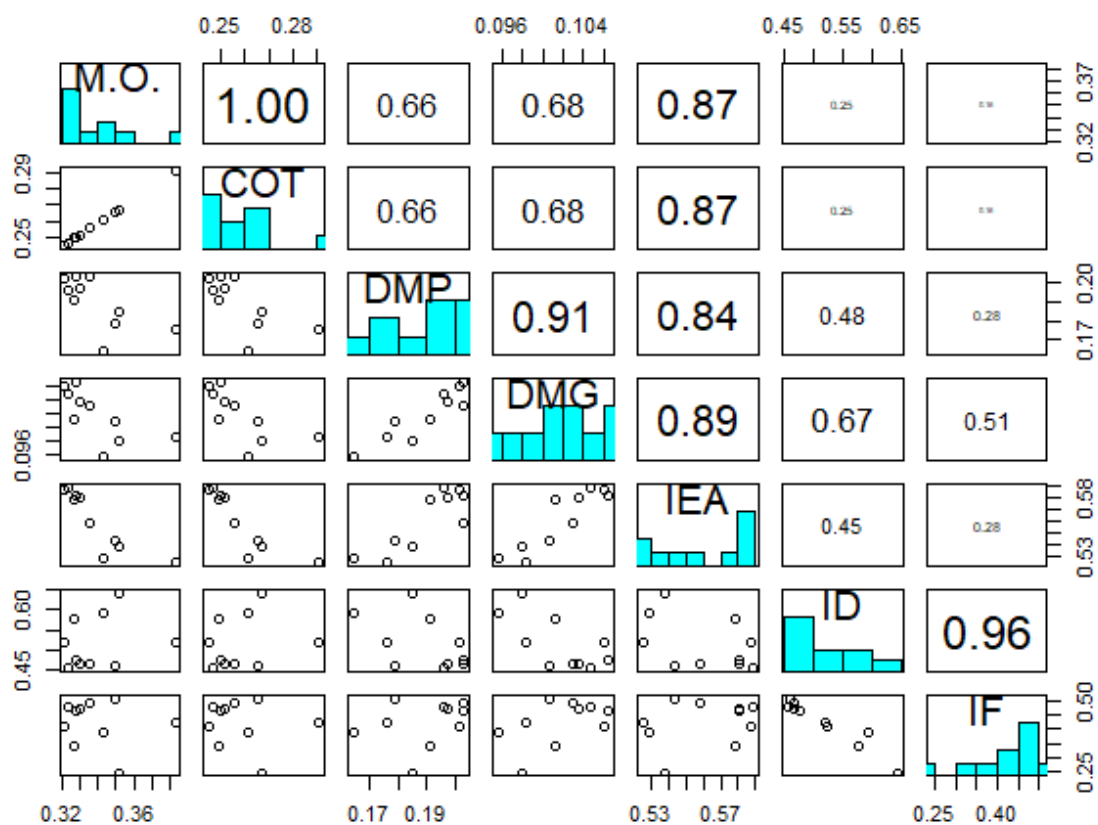


Figura 15. Correlação de Pearson dos atributos físicos do solo para a floresta.

Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. DMP: diâmetro médio ponderado. DMG: diâmetro médio geométrico. IEA: índice de estabilidade de agregados. ID: índice de dispersão. IF: índice de floculação.

De acordo com a figura 15, a MO e o COT apresentam correlação positiva no uso da floresta com a agregação do solo, apresentando correlação com o DMP (0,66), DMG (0,68) e IEA (0,87), corroborando com a hipótese de que a área de floresta possui relação e impacta na agregação do solo, em decorrência dos maiores teores de MO que influenciam no COT e conseqüentemente na agregação do solo.

O DMP apresentou uma forte correlação positiva no uso da floresta com o DMG (0,91) e com o IEA (0,84), indicando que solos com maior diâmetro médio ponderado possuem também maior diâmetro médio geométrico e maior estabilidade de agregados. O DMG também se correlaciona positivamente no uso da floresta com o IEA (0,89) e com o ID (0,67), refletindo que solos com maior diâmetro médio

geométrico possuem maior estabilidade de agregados e que podem ter maior índice de dispersão, essa correlação não é tão expressiva, sendo menor que 0,70 e pode ser explicada por se tratar de um solo arenoso, onde na área de floresta, a presença de argila foi mais expressiva do que nos outros usos do solo, devido a declividade e localização da área, que devido a floresta estar na declividade mais baixa e em toposequência, recebe partícula finas do solo carregadas dos usos da lavoura e pastagem, e com a presença de maiores agregados isso pode ocasionar maior dispersão, e possível perda de solo por erosão.

A figura 16 apresenta a correlação de Pearson para os atributos físicos no uso da pastagem que tiveram correlação acima de 0,65.

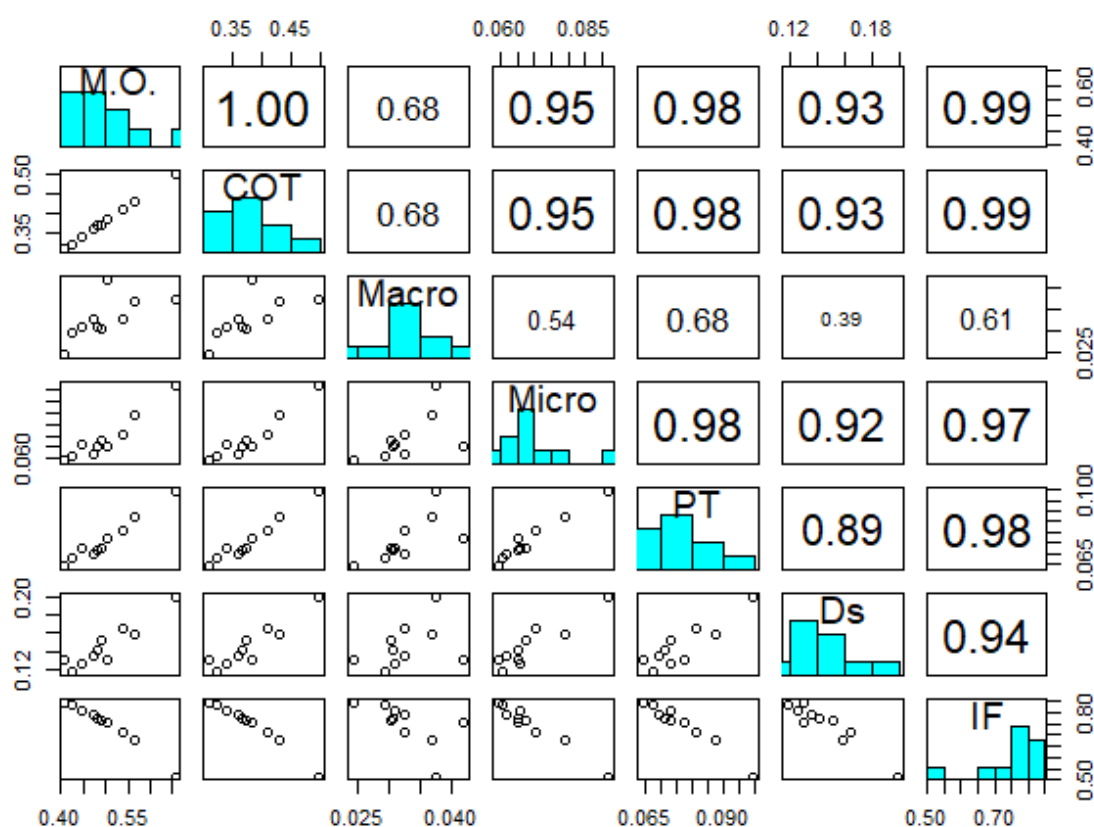


Figura 16. Correlação de Pearson dos atributos físicos do solo para a pastagem. Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. Macro: macroporosidade. Micro: microporosidade. PT: porosidade total. Ds: densidade do solo. IF: índice de flocação.

De acordo com a figura 16, a MO e o COT se correlacionaram positivamente no uso da pastagem com a macroporosidade (0,68), microporosidade (0,95), PT (0,98), Ds (0,96) e IF (0,99), refletindo que a MO e o COT aumentam a flocação e a

densidade do solo, ao mesmo tempo que elevam tanto a microporosidade quanto a macroporosidade, resultando em uma alta porosidade total, indicando que a presença de vegetação e raízes na pastagem influencia nos teores de MO e COT, que influenciam na porosidade, densidade e na flocculação, impactando em menores perdas de solo por erosão.

O uso da pastagem é caracterizado por estar compactado devido ao pisoteio de animais, e isso corrobora com a alta correlação positiva entre microporosidade e PT (0,98) e Ds (0,92) em seu uso, indicando que solos mais compactados apresentam maiores valores de porosidade e densidade, e com o IF (0,97), que pode ser explicado devido a presença de vegetação e de raízes, que melhoram a agregação e aumentam a flocculação do solo.

A PT apresentou correlação positiva positivamente no uso da pastagem com a Ds (0,89) e com o IF (0,98), e a Ds apresentou correlação positiva com o IF (0,94), indicando que quanto maior o IF, maior a PT e Ds, resultando em um solo compactado, porém com boa estrutura para retenção de água e ar, o que pode ser explicado pela presença de vegetação e raízes.

A figura 17 apresenta a correlação de Pearson para os atributos físicos no uso da lavoura que tiveram correlação acima de 0,65.

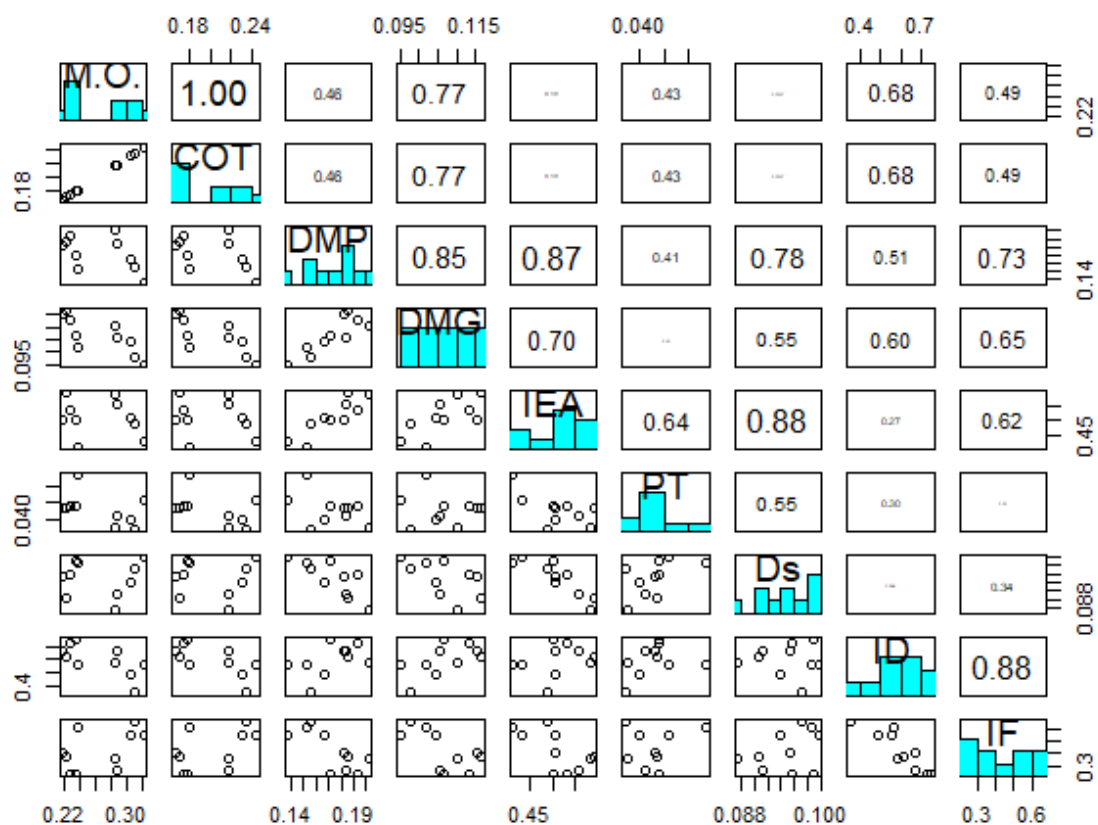


Figura 17. Correlação de Pearson dos atributos físicos do solo para a lavoura.

Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. DMP: diâmetro médio ponderado. DMG: diâmetro médio geométrico. IEA: índice de estabilidade de agregados. PT: porosidade total. Ds: densidade do solo. ID: índice de dispersão. IF: índice de floculação.

De acordo com a figura 17, a MO e o COT apresentaram correlação positiva no uso da lavoura apenas com o DMG (0,77) e o ID (0,68), indicando que na lavoura a MO e o COT influenciam no diâmetro médio geométrico dos agregados e na dispersão, o que pode ser explicado pelo uso intensivo.

O DMP possui correlação positiva no uso da lavoura com o DMG (0,85), IEA (0,87), Ds (0,78) e IF (0,73), indicando que, à medida que o DMP aumenta, o DMG também tende a aumentar, bem como, o IEA aumenta, pois, solos com maiores DMP tendem a ter agregados maiores e mais estáveis, bem como, aumenta a Ds e o IF, o que pode ser explicado porque o aumento do tamanho dos agregados tende a reduzir o espaço vazio entre eles, aumentando a Ds, e a correlação positiva entre DMP e o IF indica que solos com agregados maiores e mais estáveis também possuem maior capacidade de floculação, o que sugere que o solo possui partículas que se unem mais facilmente para formar agregados maiores, contribuindo para a estabilidade da

estrutura do solo.

O DMG possui correlação positiva no uso da lavoura com o IEA (0,70), indicando que solos com agregados maiores melhoram a estabilidade à erosão. O IEA possui correlação positiva com a Ds (0,88), sugerindo que solos com maior estabilidade de agregados tendem a ter maior densidade, indicando que a estabilidade do solo é influenciada pela compactação, o que é corroborado por se tratar solo arenoso, e o uso do solo com lavoura apresentar o menor teor de argila (tabela 1).

Analisando as figuras 15, 16 e 17, o COT exerce uma influência importante na estrutura do solo, variando de acordo com o uso do solo. Na floresta, o aumento do teor de COT está diretamente ligado à agregação do solo, o que fortalece a coesão entre as partículas e melhora a estrutura do solo. Em pastagens, o COT influencia positivamente a porosidade e a floculação, o aumento do COT, resulta em um solo com maior capacidade de retenção de água e boa estabilidade estrutural. Já em áreas de lavoura, o COT apresenta uma relação com o aumento do tamanho dos agregados e do índice de dispersão, o que pode tornar o solo mais suscetível à desagregação em condições de umidade, exigindo manejo cuidadoso para manter a estabilidade estrutural. King et al. (2020) também encontrou correlação positiva com a agregação e os níveis de matéria orgânica do solo.

5.6 CONCLUSÃO

O uso do solo afetou a sua qualidade física e os diferentes usos do solo alteram a estabilidade e agregação do solo. O solo de floresta apresentou uma boa relação entre macro e microporos e menor densidade do solo. Por esse motivo, o carbono orgânico total apresentou correlação positiva com a agregação do solo no uso da floresta. O teor de carbono orgânico total influenciou na agregação no uso da floresta e na aeração no uso da pastagem. A estabilidade de agregados não apresentou diferenças significativas entre os usos na camada superficial. No entanto, os atributos físicos tiveram um maior impacto negativo no uso do solo com lavoura.

5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of crustability and erodibility: 1. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, v.47, p.425-437, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
- ABRISHAMKESH, S.; GORJI, M.; ASADI, H. Long-term effects of land use on soil aggregate stability. *International Agrophysics*, v.25, n.2, p.103-108, 2011.
- AHAMMAD, R.; STACEY, N.; EDDY, I.; TOMSCHA, S.; SUNDERLAND, T. Recent trends of forest cover change and ecosystem services in eastern upland region of Bangladesh. *The Science of the Total Environment*, v.647, p.379-389, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.406>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711 – 728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BARRAL, M.; ARIAS, M.; GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, v.46, p.261-272, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00092-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00092-0)
- BARROS, L. R.; RIBON, A. A.; FERNANDES, K. L.; SOUZA, J. L. O.; CARRECHEL, V.; BACKES, C.; SANTOS, A. J. M.; ALVES, A. R. Integrated management systems for the improvement of the physical-hydric quality of a cerrado oxisol. *Australian Journal of Crop Science*, v.12, n.4, p.711-716, 2018. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.05.PNE793>
- BATEY, T. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, v.25, n.4, p.335-345, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. *Soil physics*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, p.529, 1972.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, p.677-683, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700009>
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.6, p.843-849, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600002>
- BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Eds.). *Modifying the root environment to reduce crop stress*. Michigan: ASAE Monograph, p.18-57, 1981.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v.124, n.1-2, p.3-22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Mecânica dos solos. São Carlos: USP/EESC, 1998.

BUURMAN, P.; JONGMANS, A.; PI PUJOL, M. Clay illuviation and mechanical clay infiltration - Is there a difference? *Quaternary International*, v.51, p.66-69, 1998. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(98\)90225-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)90225-7)

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ, p.132, 1997.

CASTIONE, G. A. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M. Variabilidade espacial da textura do solo em área irrigada por pivô central em diferentes posições na paisagem. *Agro@ambiente*, v.9, n.3, p.219-226, 2015. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i3.2392>

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.527-538, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019>

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. *Soil and Tillage Research*, v.37, n.2-3, p.113-125, 1996. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01008-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01008-2)

CONANT, R. T.; SIX, J.; PAUSTIAN, K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. II. changes in soil carbon fractions along a forest to pasture chronosequence. *Biology and Fertility of Soils*, v.40, p.194-200, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0754-2>

CORRÊA, J. C.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORAES, M. H. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, n.2, p.263-272, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S010006832009000200004>

COSTA, E.; SILVA, H.; RIBEIRO, P. R. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. *Enciclopédia Biosfera*, v.9, n.17, 2013.

DEXTER, A. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v.120, p.201-214, 2004. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2003.09.004>

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology*, v.17, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>

EMADODIN, I.; REISS, S.; BORK, H. A study of the relationship between land management and soil aggregate stability (case study near Albersdorf, northern-Germany). *Journal of Agricultural and Biological Science*, v.4, p.48-53, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (org.). Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, p.577, 2017.

FEDELE, G.; LOCATELLI, B.; DJOUDI, H.; COLLOFF, M. Reducing risks by transforming landscapes: Cross-scale effects of land-use changes on ecosystem services. *PLoS ONE*, v.13, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195895>

FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; NASCIMENTO GUEDES, J.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. *Soil and Tillage Research*, v.198, p.1-9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104533>

FERREIRA, P. L. S.; PEREIRA, F. O.; MORAES, J. O. B.; DUTRA, D. T.; AMARAL, J.; FERREIRA, A. M. Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.13, p.581–589, 2018. <https://doi.org/10.18378/rvads.v13i5.6246>

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono Orgânico (Cáp. 1). In: *Manual de métodos de análise de solo*, 360–367. Brasil, Embrapa-RJ, 2017.

FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E.; SIX, J.; WALL, D. H.; CERRI, C. C. Linking soil engineers, structural stability, and organic matter allocation to unravel soil carbon responses to land-use change. *Soil Biology and Biochemistry*, v.150, p.e107998, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107998>

GASPARETTO, E. C.; BARIDA, J. A.; CARNEIRO, M.; SCARIOT, J. J.; TABOLKA, C. L. Grau de floculação da argila de um Latossolo Vermelho utilizado com lavoura e mata nativa. *Synergismus Scyentifica*, v.04, p.1-3, 2007.

GEISSEN, V.; SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ, R.; KAMPICHLER, C.; RAMOS-REYES, R.; SEPULVEDA-LOZADA, A.; OCHOA-GOANA, S.; HERNÁNDEZ-DAUMAS, S. Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, v.151, p.87-97, 2009. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2009.03.011>

HAMAMOTO, S.; MOLDRUP, P.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T. Effect of particle size and soil compaction on gas transport parameters in variably saturated, sandy soils. *Vadose Zone Journal*, v.8, n.4, p.986-995, 2009. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0157>

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, v.82, n.2, p.121-145, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

HAYES, A. Soil physical properties. In: *Properties and management of soils in the tropics*. 2017. <https://doi.org/10.1017/9781316809785.008>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Divisão Territorial Brasileira – DTB, 2020.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.79, p.9-16, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0)

JHA, P.; MOHAPATRA, K. P.; DUBEY, S. K. Impact of land use on physico-chemical and hydrological properties of ustifluent soils in riparian zone of river Yamuna, India. *Agroforestry Systems*, v.80, p.437-445, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9338-3>

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, v.5, p.425-442, 1986. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>

KIEHL, E. J. *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Ceres, p.262, 1979.

KING, A. E.; ALI, G. A.; GILLESPIE, A. W.; WAGNER-RIDDLE, C. Soil Organic Matter as Catalyst of Crop Resource Capture. *Frontiers in Environmental Science*, v.8, p.1-8, 2020. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00050>

KLEIN, V. A. *Física do solo*. Passo Fundo: Ediupf, 2008.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, v.7, n.5, p.5875-5895, 2015. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v.304, n.5677, p.1623-1627, 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

LAPAZ, A. M.; BONINI, C. S. B.; OLIVÉRIO, G. L.; SANTOS, T. P.; CHITERO, J. G.; HEINRICH, R.; BONINI NETO, A.; YOSHIDA, C. H. P.; COSTA, N. R.; PIAZENTIN, J. C. State of the Art: Soil Physical Attributes. *Journal of Experimental Agriculture International*, Baltimore, v.39, n.5, p.1-12, 2019. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v39i530348>

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Advison Soil Science*, v.1, p.277-294, 1985. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3>

MARTÍNEZ-TRINIDAD, S.; COTLER, H.; CRUZ-CÁRDENAS, G. The aggregates stability indicator to evaluate soil spatiotemporal change in a tropical dry ecosystem. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v.12, p.363-377, 2012. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012000200015>

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P. Análise multivariada espacial na estimativa de erodibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.6, p.2175-2182, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600032>

MORATELLI, F., ALVES, M., BORELLA, D., KRAESKI, A., ALMEIDA, F., ZOLIN, C., HOSHIDE, A., & SOUZA, A. Effects of Land Use on Soil Physical-Hydric Attributes in Two Watersheds in the Southern Amazon, Brazil. *Soil Systems*, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040103>

MOTA, J. C. A.; ALENCAR, T. C.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Alterações físicas de um Cambissolo cultivado com bananeira irrigada na capada do Apodi. *Revista Brasileira*

de Ciência do Solo, v.39, p.1015-1024, 2015.
<https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140018>

MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M.; MCMURTRIE, R.; MCGILVRAY, H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, v.8, n.2, p.105-123, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2001.00459.x>

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTOS, L. L.; HERNANDO, I. D.; PANACHUKI, E. Densidade do solo e densidade relativa de um Latossolo vermelho submetido a diferentes usos. *Agrotropica*, v.29, n.1, p.31-38, 2017. <https://doi.org/10.21757/0103-3816.2017v29n1p31-38>

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná. Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Curitiba-PR, SBCS/NEPAR, cap.3, p.82, 2017.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. D. F.; ZEMPULSKI, H. D. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR. (Circular, 76), p.38, 1992a.

PAVAN, M. A.; ROTH, C. H. Effect of lime and gypsum on chemical composition of runoff and leachate from samples of a Brazilian Oxisol. *Ciência e Cultura*, v.44, p.391-394, 1992b.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, L.; MELO, L. B. B.; AZEVEDO, R. P.; ARAÚJO, B. C. L.; CARVALHO, T. S.; MOREIRA, S. G.; CURI, N. Occasional tillage in no-tillage systems: a global meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, v.745, p.140887, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; BLAIR, R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, v.267, n.5201, p.1117-1123, 1995. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>

PRADO, R. M.; CENTURION, J. F. Alterações da cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, n.1, p.197-203, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000100024>

PRADO, R. M.; NATALE, W. Alterações na granulometria, grau de floculação e propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico, sob plantio direto e reflorestamento. *Acta Scientiarum: Agronomy*, v.25, n.1, p.45-52, 2003. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v25i1.2344>

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <<http://www.R-project.org>> Acesso em out. 2024.

RAWLS, W.; PACHEPSKY, Y. Soil consistence and structure as predictors of water retention. *Soil Science Society of America Journal*, v.66, p.1115-1126, 2002. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2002.1115>

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*, v.27, p.29-48, 2003.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1805-1816, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. *Bragantia*, v.68, n.2, p.1095-1103, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400030>

SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, n.2, p.681-689, 2000. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solos. 3.ed. Revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, p.573, 2017.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v.33, n.2, p.141-163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.

TOOHEY, R. C.; BOOL, J.; BROOKS, E. S.; JONES, J. R. Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica. *Geoderma*, v.315, p.138-148, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.044>

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. (Circular Técnica, 23). Londrina: Embrapa Soja, p.58, 1999.

VAN LIER, Q. J. Física do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do solo. 2010.

VAN STRAATEN, O.; CORRE, M.; WOLF, K.; TCHIENKOUA, M.; CUELLAR, E.; MATTHEWS, R.; VELDKAMP, E. Conversion of lowland tropical forests to tree cash crop plantations loses up to one-half of stored soil organic carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.112, p.9956-9960, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504628112>

WENDLING, B.; FREITAS, I. C. V.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de Conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e Plantio direto. *Bioscience Journal*, v.28, p.256-265, 2012.

WILLY, D. K.; MUYANGA, M.; MBUVI, J.; JAYNE, T. The effect of land use change on soil fertility parameters in densely populated areas of Kenya. *Geoderma*, v.343, p.254-262, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.033>

6 CAPÍTULO 2 - ARTIGO B: IMPACTOS DO USO DO SOLO NA FERTILIDADE DE UM SOLO ARENOSO

6.1 RESUMO

Os solos arenosos apresentam desafios para a agricultura devido à sua baixa fertilidade natural, o que aumenta a necessidade de insumos e práticas adequadas de manejo, pois o manejo intensivo acelera a degradação e a perda de nutrientes essenciais. A alteração do uso do solo, especialmente com a remoção da vegetação natural, intensifica a perda da fertilidade natural, aumentando a demanda por adubos químicos, comprometendo a sustentabilidade da produção agrícola. O objetivo do estudo foi avaliar a relação do carbono orgânico total com os usos de lavoura, pastagem e floresta e sua influência na fertilidade de um solo arenoso. A área de estudo está localizada no município de Rio Branco do Ivaí - PR, com três tipos de uso: lavoura, pastagem e floresta nativa. A qualidade do solo pode ser analisada através dos indicadores químicos, dessa forma, foram avaliadas as características químicas pH, P, K⁺, Al⁺³, Ca⁺², Mg⁺², H+Al, CTC efetiva e potencial, soma de bases (SB), saturação de alumínio (m%), saturação de bases (V%), matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT). O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) entre as três áreas, com cinco repetições cada, os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA e comparados pelo teste Tukey (5%), análise de componentes principais (PCA) e correlação de Pearson entre as variáveis para cada uso do solo. Todos os tratamentos apresentaram solo ácido, e os teores de K e Al foram maiores na floresta, e os teores de Ca+Mg, CTC, SB e V% foram maiores na floresta e pastagem, e a m foi maior na floresta e lavoura. O COT apresentou maiores valores na floresta. Dessa forma, as perturbações ocasionadas pela agricultura resultam em uma menor acumulação de MO e aceleram a sua decomposição na área de lavoura, reduzindo os níveis de COT, comprometendo a sua qualidade química, bem como, a pastagem e lavoura sofreram impactos em sua fertilidade devido a exportação de nutrientes pela colheita e sua extração pela alimentação animal, respectivamente. A floresta possui correlação positiva entre a MO e COT com o pH, Ca+Mg, Ca, SB e V%, refletido pela ciclagem de nutrientes. A pastagem possui correlação positiva entre a MO e COT com a SB e V%, resultado da ausência de reforma de pastagem e manejo inadequado. A lavoura possui correlação positiva entre a MO e COT com o pH, P, K e V%, justificado pela adubação química. Conclui-se que o uso do solo apresentou impacto nos atributos químicos do solo.

Palavras-chave: saúde do solo, fertilidade, qualidade química, nutrientes do solo e manejo do solo.

6.2 ABSTRACT

Sandy soils present challenges for agriculture due to their low natural fertility, which increases the need for appropriate inputs and management practices, since intensive management accelerates degradation and loss of essential nutrients. Changes in land use, especially with the removal of natural vegetation, intensify the loss of natural fertility, increasing the demand for chemical fertilizers, compromising the sustainability of agricultural production. The objective of the study was to evaluate the relationship between total organic carbon and crops, pasture and forest uses and their influence on the fertility of a sandy soil. The study area is in the municipality of Rio Branco do Ivaí - PR, with three types of use: crop, pasture and native forest. Soil quality can be analyzed through chemical indicators, thus, the chemical characteristics pH, P, K⁺, Al⁺³, Ca⁺², Mg⁺², H+Al, effective and potential CTC, sum of bases (SB), aluminum saturation (m%), base saturation (V%), organic matter (OM) and total organic carbon (TOC) were evaluated. The experiment was carried out using a completely randomized design (CRD) between the three areas, with five replicates each. The data were subjected to analysis of variance and compared by the Tukey test (5%), principal component analysis (PCA) and Pearson correlation between the variables for each land use. All treatments presented acidic soil, and the K and Al contents were higher in the forest, and the Ca+Mg, CTC, SB and V% contents were higher in the forest and pasture, and m was higher in the forest and cropland. The TOC showed higher values in the forest. Thus, the disturbances caused by agriculture result in a lower accumulation of OM and accelerate its decomposition in the crop area, reducing the TOC levels, compromising its chemical quality, as well as the pasture and cropland suffering impacts on their fertility due to the export of nutrients by harvesting and their extraction by animal feed, respectively. The forest has a positive correlation between OM and TOC with pH, Ca+Mg, Ca, SB and V%, reflected by nutrient cycling. The pasture has a positive correlation between OM and TOC with SB and V%, resulting from the lack of pasture reform and inadequate management. The crop has a positive correlation between OM and TOC with pH, P, K and V%, justified by chemical fertilization. It is concluded that land use has an impact on soil chemical attributes.

Keywords: soil health, fertility, chemical quality, soil nutrients and soil management.

6.3 INTRODUÇÃO

Os solos arenosos representam 8% dos solos brasileiros (Donagemma et al., 2016) e são um desafio para a produção agrícola devido ao baixo teor de matéria orgânica e baixa capacidade de retenção de água para as plantas. A produção agrícola depende diretamente do solo e o seu uso e manejo pode comprometer a produtividade, pois as práticas inadequadas de manejo têm contribuído para sua degradação (Ferreira et al., 2018).

As principais fragilidades dos solos arenosos incluem susceptibilidade a erosão, baixa fertilidade natural e uma menor capacidade de armazenar nutrientes, o que pode levar à necessidade de aplicações de doses maiores de adubos químicos para sustentar o desenvolvimento das culturas (Brady; Weil, 2009).

A alteração do uso é mais impactante em solos arenosos que são mais vulneráveis à erosão. A remoção da cobertura vegetal natural aumenta a erosão, resultando na perda de solo superficial e de nutrientes essenciais, o que pode levar a degradação, onde a fertilidade diminui continuamente, necessitando de mais insumos para sustentar a produção agrícola (Reichert et al., 2016).

Práticas inadequadas de manejo, como o uso excessivo de adubos químicos ou técnicas de cultivo intensivo, podem acentuar esses problemas, levando à degradação do solo (Cordeiro et al., 2021). No entanto, práticas de manejo que incorporam resíduos de culturas ou adubos orgânicos podem aumentar os níveis de carbono orgânico, melhorando a fertilidade do solo (Ramos et al., 2023).

Segundo Conceição et al. (2005) a avaliação dos teores de matéria orgânica e carbono orgânico no solo tem sido reconhecida como um indicativo de sua qualidade, uma vez que representa a fonte primária de nutrientes para as plantas.

A cobertura vegetal influencia a qualidade química, através do teor de matéria orgânica, carbono orgânico, acidez e quantidade de nutrientes presentes (Araújo et al., 2012). Dessa forma, o objetivo do estudo foi avaliar a relação do carbono orgânico total com os usos de lavoura, pastagem e floresta e sua influência na fertilidade de um solo arenoso.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada encontra-se no município de Rio Branco do Ivaí - PR (24°20'16,139" S e 51°18'17,957" W) com altitude média de 650 m, localizado na Região Norte Central Paranaense (IBGE, 2020). O clima é caracterizado como subtropical úmido Cfa, conforme a classificação de Köppen-Geiger com temperaturas médias de 20°C e precipitação média anual de 1650 mm (Alvares et al., 2013).

As áreas selecionadas para este estudo foram: 1) lavoura, culturas agrícolas temporárias com mais de 10 anos de plantio direto e sem rotação de culturas; 2) pastagem extensiva, com mais de 10 anos de pastejo e sem reforma; e 3) floresta nativa.

As coletas e análises do solo foram realizadas conforme o Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos (Embrapa, 2017). Para a caracterização e a avaliação química do solo, foram selecionados 5 pontos de coleta em cada área, para a química utilizou-se as profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Os atributos químicos pH, P, K⁺, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, CTC efetiva e potencial, soma de bases (SB), saturação de alumínio (m%), saturação de bases (V%) foram realizados de acordo com a metodologia descrita em Teixeira et al. (2017) e a determinação da matéria orgânica de acordo com a metodologia descrita por Pavan et al. (1992) e o carbono orgânico total foi determinado pelo método Walkley-Black proposto por Fontana; Campos (2017).

O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento experimental inteiramente causalizado (DIC) entre as três áreas, com cinco repetições cada. Os dados foram comparados pelo teste ANOVA seguido de Tukey a 5% de probabilidade. Para ordenação dos dados utilizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) e a análise de correlação de Pearson entre a matéria orgânica e carbono orgânico total e os atributos físicos, químicos e biológicos, entre as variáveis para cada uso do solo. A estatística foi realizada no software R (R Development Core Team, 2024).

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 6 são apresentados os valores de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tabela 6. Teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tratamento	MO ⁽¹⁾ g kg ⁻¹	COT ⁽²⁾ g kg ⁻¹
Profundidade 0-10 cm		
Floresta	26,51a*	15,38a
Pastagem	18,03b	10,46b
Lavoura	8,63c	5,01c
CV (%)	11,63	11,63
p-valor	p<0,001	p<0,001
Profundidade 10-20 cm		
Floresta	24,03a	13,94a
Pastagem	16,77b	9,73b
Lavoura	8,17c	4,74c
CV (%)	2,79	2,79
p-valor	p<0,001	p<0,001

¹ Matéria orgânica do solo (g kg⁻¹). ² Carbono orgânico total (g kg⁻¹). *Valores seguidos da mesma letra minúscula na vertical, para a mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Os resultados mostram que os teores de MO e COT foram superiores na floresta nas duas profundidades analisadas. De acordo com Silva et al. (2012), o teor de carbono nas áreas florestais pode estar associado à maior quantidade de resíduos vegetais produzidos pelas espécies florestais e presença de raízes das gramíneas, bem como, à ciclagem de nutrientes.

Os dados encontrados apresentam a mesma tendência da pesquisa de Coutinho et al. (2017), que relata que as áreas de lavoura apresentaram valores de carbono orgânico inferiores que a floresta e pastagem.

Áreas com agricultura, geralmente, apresentam teores de COT mais baixos em comparação com a pastagem, e a intensificação dos sistemas agrícolas convencionais tende a diminuir a quantidade de MO no solo ao longo do tempo (Baldotto et al., 2015).

Para Sánchez-Navarro et al. (2020), o armazenamento de COT sofre influência tanto do uso e manejo empregado quanto de sua interação com o tipo de cultura cultivada, pois práticas de manejo intensivas, como o uso excessivo de adubos químicos e a ausência de rotação de culturas, podem contribuir para a diminuição dos teores de COT.

A distribuição de COT com a profundidade do solo também é um aspecto importante a considerar, geralmente, os teores de COT tendem a diminuir com a profundidade devido à menor presença de MO. Isso foi observado nos resultados encontrados, a floresta reduziu o COT de 15,38 para 13,94 g kg⁻¹, a pastagem reduziu

de 10,46 para 9,73 g kg⁻¹ e a lavoura reduziu de 5,01 para 4,74 g kg⁻¹ em profundidade.

A redução dos teores de COT nas profundidades de 0-10 para 10-20 cm foi de 9,36% para a floresta, para a pastagem a redução foi de 6,97%, e para a lavoura a redução foi de 5,38%.

Ao observar a distribuição do COT em profundidade, a floresta teve uma redução mais intensa (9,36%), o que é justificado pois na profundidade de 0-10 cm, a floresta apresenta maior quantidade matéria orgânica do que a pastagem e lavoura, e em razão da lavoura apresentar baixo teor de matéria orgânica na camada superficial, a perda de COT em profundidade foi mais suave para a lavoura.

Todos os usos do solo apresentaram redução do COT em profundidade. Klepker; Anghinoni (1995) observaram que em sistema plantio direto a distribuição de COT não é uniforme ao longo do perfil. Os maiores teores de COT na profundidade de 0-10 cm na lavoura podem ser explicados pela cobertura do solo com palhada. Teixeira et al. (2003) também observou a redução de COT em profundidade para o uso do solo.

A introdução de sistemas de cultivo diversificados e práticas de conservação, como a rotação de culturas e a adubação verde, pode ajudar a aumentar os níveis de COT (Ribeiro et al., 2011). Tais práticas são fundamentais para assegurar a resiliência dos sistemas agrícolas e ambientais frente ao manejo intenso. Lal (2015) argumenta o potencial benefício da adoção de técnicas que não só mantenham, mas também melhorem o conteúdo de MO, a atividade biológica e a estrutura do solo. Lal (2004) destaca as práticas agrícolas sustentáveis, como a agricultura de conservação, que ao reincorporar resíduos de culturas ao solo, não apenas enriquecem a qualidade do solo, mas também contribuem para o sequestro de carbono, atenuando os efeitos das mudanças climáticas.

O manejo atual da área de pastagem, é caracterizado por baixa produtividade de forragem e incidência de plantas invasoras, mas possui presença de raízes de gramíneas, o que acarreta maior teor de MO que a lavoura, o qual apresenta diferenças estatísticas entre a floresta e lavoura nas duas profundidades (Tabela 6), seguindo a mesma tendência no COT. A MO influencia na disponibilidade e capacidade de estoque de nutrientes no solo, e isso impacta na adubação química na lavoura.

Os resultados referentes a caracterização química do solo para os três usos do solo, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7. Caracterização química para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e de 10-20 cm.

Trat.	pH ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	K ⁽³⁾	Al ³⁺ ⁽⁴⁾	Ca ⁺² ⁽⁵⁾	Mg ²⁺ ⁽⁶⁾	Ca+Mg ⁽⁷⁾	H+Al ⁽⁸⁾	SB ⁽⁹⁾	CTC-ef ⁽¹⁰⁾	CTC pH7 ⁽¹¹⁾	m% ⁽¹²⁾	V% ⁽¹³⁾
CaCl ₂	mg dm ⁻³ ----- cmol _c dm ⁻³ ----- %-----												
Profundidade 0-10 cm													
Flor ¹⁴	4,22b*	4,01a	0,36a	1,23a	3,33a	0,88a	4,21a	5,24a	4,57a	5,81a	9,81a	22,37a	46,02a
Pas ¹⁵	4,48a	3,71a	0,03c	0,31b	2,90a	0,59ab	3,49a	5,30a	3,53ab	3,84ab	8,83ab	8,91b	39,10ab
Lav ¹⁶	4,06b	4,60a	0,16b	0,49b	1,29a	0,38b	1,68b	4,61a	1,84b	2,33b	6,45b	20,82a	28,82b
CV %	2,94	26,12	16,59	21,27	25,05	21,80	18,58	21,73	17,75	31,61	20,08	37,40	23,88
p-valor	0,001	0,431	0,001	0,001	0,049	0,047	0,01	0,566	0,008	0,015	0,023	0,001	0,034
Profundidade 10-20 cm													
Flor ¹⁴	4,12b	3,87a	0,33a	1,34a	2,57a	0,54a	3,11a	5,33a	3,44a	4,78a	8,77a	27,72a	39,80a
Pas ¹⁵	4,56a	2,93a	0,02c	0,43b	2,24a	0,39a	2,64a	4,19a	2,66a	3,10b	6,85b	12,92b	39,12a
Lav ¹⁶	4,12b	3,34a	0,15b	0,63ab	1,22b	0,31a	1,53b	3,81a	1,68b	2,31b	5,49b	27,37a	30,42a
CV %	3,09	26,33	10,04	25,24	19,03	23,77	10,39	10,67	9,61	20,34	7,74	35,90	17,00
p-valor	p<0,001	0,281	0,001	0,006	0,001	0,223	0,001	0,081	p<0,001	0,002	0,002	0,006	0,061

¹Potencial hidrogeniônico (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹). ² Fósforo disponível no solo. ³ Potássio. ⁴ Alumínio, ⁵ Cálcio. ⁶ Magnésio. ⁷ Soma de cálcio e magnésio. ⁸ Acidez potencial. ⁹ Soma de bases. ¹⁰ Capacidade de troca catiônica efetiva. ¹¹ Capacidade de troca catiônica potencial. ¹² Saturação de alumínio. ¹³ Saturação por bases. ¹⁴ Floresta. ¹⁵ Pastagem. ¹⁶ Lavoura. *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

A qualidade do solo pode ser analisada através dos indicadores químicos, que são, pH, matéria orgânica, acidez do solo e os nutrientes N, P e K (Doran; Parkin, 1994). O pH é um indicador da acidez do solo e de acordo com a tabela 7, o solo é ácido em todos os tratamentos, e foram menores para a lavoura e floresta nas duas profundidades.

A área de floresta e pastagem não receberam nenhuma adubação química ou correção do solo. Na área de lavoura é realizada a adubação em linha das culturas de soja e milho ou aveia, para a recomendação de adubação não é realizada análise química do solo, com predominância de uso de NPK. Não é realizado o período de pousio na área. A calagem é feita há cada 10 anos aproximadamente, sendo que a quantidade a ser aplicada é determinada pela análise química do solo, que é feita a partir de uma amostra composta de três pontos da área. A última aplicação de calagem foi realizada há aproximadamente 8 anos.

A acidificação do solo em áreas agrícolas é frequentemente observada devido ao uso intensivo de fertilizantes nitrogenados e a extração e exportação de bases do solo (Ca, Mg e K) na colheita ou na alimentação animal, que poderiam neutralizar a acidez (Tang et al., 2013), o que é compatível com os resultados encontrados, que

indicam o menor pH do uso do solo com a lavoura, o que é justificado pois as coletas de solo foram realizadas após a colheita da soja. Além disso, o manejo intensivo da agricultura contribui para uma redução do pH do solo, devido, além dos fatores citados anteriormente, o aumento da lixiviação de cátions básicos e aumento na concentração de íons H^+ (Zajícová; Chuman, 2019).

O pH do solo é mais baixo na lavoura na camada de 0-10cm (4,06), diferindo estatisticamente da área de pastagem, e na camada de 10-20 cm, o pH da lavoura foi estatisticamente semelhante ao da floresta (4,12), os quais diferiram estatisticamente da pastagem. Os valores de pH da lavoura e floresta não diferiram estatisticamente nas duas profundidades.

O P não apresentou diferença significativa entre os usos nas duas profundidades, e apresentou redução nos seus teores em profundidade, Islam et al. (2024) explica que a baixa mobilidade do P no solo também contribui para o acúmulo na camada superficial.

O K foi maior na floresta e menor na pastagem nas duas profundidades, e apresentou a mesma tendência em profundidade, no caso do solo da floresta, isso pode ser explicado pelo fato de que o K, sendo um cátion altamente móvel, pode ser redistribuído no perfil do solo (Hinsinger et al., 2021). E no caso do solo da pastagem, isso pode ser explicado pela exportação de bases através da alimentação animal.

O Al foi maior na floresta na profundidade de 0-10 cm e maior na floresta e lavoura na profundidade de 10-20 cm, indicando que a floresta possui maior teor de Al, caracterizado pela falta de calagem. No solo da lavoura, o Al está mais presente na profundidade de 10-20cm, o que é explicado pois a calagem é realizada na superfície e tem baixa mobilidade no solo. O Al é considerado alto para valores acima de $1,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$, o que pode causar engrossamento das raízes, redução no crescimento das plantas, formação de pelos radiculares, o que prejudica a absorção de água e nutrientes (Prezotti; Guarçoni, 2013). A floresta apresentou valores de Al acima de $1,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$, nas duas profundidades analisadas.

A saturação por alumínio (m%) foi maior na floresta e lavoura, nas duas profundidades analisadas, apresentando valores acima de 20%. Na profundidade de 0-10 cm, apesar da lavoura apresentar diferença significativa no teor de Al em relação a floresta, a m% não se diferenciou estatisticamente, visto que a floresta tem maior teor de Al, mas também tem mais cátions no geral (Ca, K, Mg), essa maior quantidade de cátions no solo da floresta acontece pelo maior teor de MO, que gera mais cargas

negativas, o que contribui para reter mais cátions na solução do solo. Na pastagem o nível de m% é considerado intermediário, e na floresta e lavoura é considerado tóxico (Cruz et al., 1996), podendo causar prejuízos ao desenvolvimento das plantas.

O Ca não apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos na profundidade de 0-10 cm, e na profundidade de 10-20 cm, a floresta e pastagem apresentaram maiores valores, indicando que em profundidade o Ca reduziu na lavoura, o que pode ser justificado pois na camada superficial, ocorre a adubação química.

O Mg na floresta e pastagem apresentou maiores valores na profundidade de 0-10 cm, e na profundidade de 10-20 cm não apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos.

A soma de Ca e Mg é mais alta na floresta e pastagem, diferindo estatisticamente da lavoura, nas duas profundidades, refletindo a extração de nutrientes do solo para o desenvolvimento das culturas agrícolas na lavoura.

A acidez potencial não diferiu estatisticamente para os usos nas duas profundidades. Os teores de acidez potencial tendem a ser mais elevados em solos com altos teores de MO, o que foi observado para a floresta e pastagem, apesar de não apresentarem diferença estatística entre a lavoura, especialmente quando esses solos exibem níveis reduzidos de pH do solo (Prezotti; Guarçoni, 2013). A acidez potencial e a presença do íon alumínio (Al^{+3}) são prejudiciais ao metabolismo do solo devido à sua toxicidade, pois quando o Al reage com a água, ocorre a liberação de íons de hidrogênio, contribuindo negativamente para a alteração dos valores de pH (Lepsch, 2011).

A capacidade de troca catiônica efetiva (CTC-ef), capacidade de troca catiônica potencial (CTC pH 7) e a soma de bases (SB) foram maiores na floresta e pastagem e não apresentaram diferença estatística entre si, para a profundidade de 0-10 cm, e na profundidade de 10-20 cm, a CTC-ef e a CTC pH7 foi maior na floresta, e a SB foi maior na floresta e pastagem. A agricultura intensiva pode reduzir a CTC e a SB devido à perda de matéria orgânica e à degradação do solo (Silva et al., 2015).

A saturação de bases (V%) indica a proporção da CTC do solo que é preenchida pelas bases trocáveis (Embrapa, 2017). O valor de V% foi maior na floresta e pastagem na profundidade de 0-10 cm, e na profundidade de 10-20 cm os valores não se diferenciaram estatisticamente, o que é corroborado pelos valores encontrados na lavoura em relação a saturação de alumínio, com 20,82 e 27,37%, para as

profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente.

A figura 18 apresenta a Análise de Componentes Principais (PCA) para os atributos químicos e os de usos do solo na profundidade de 0-10 cm.

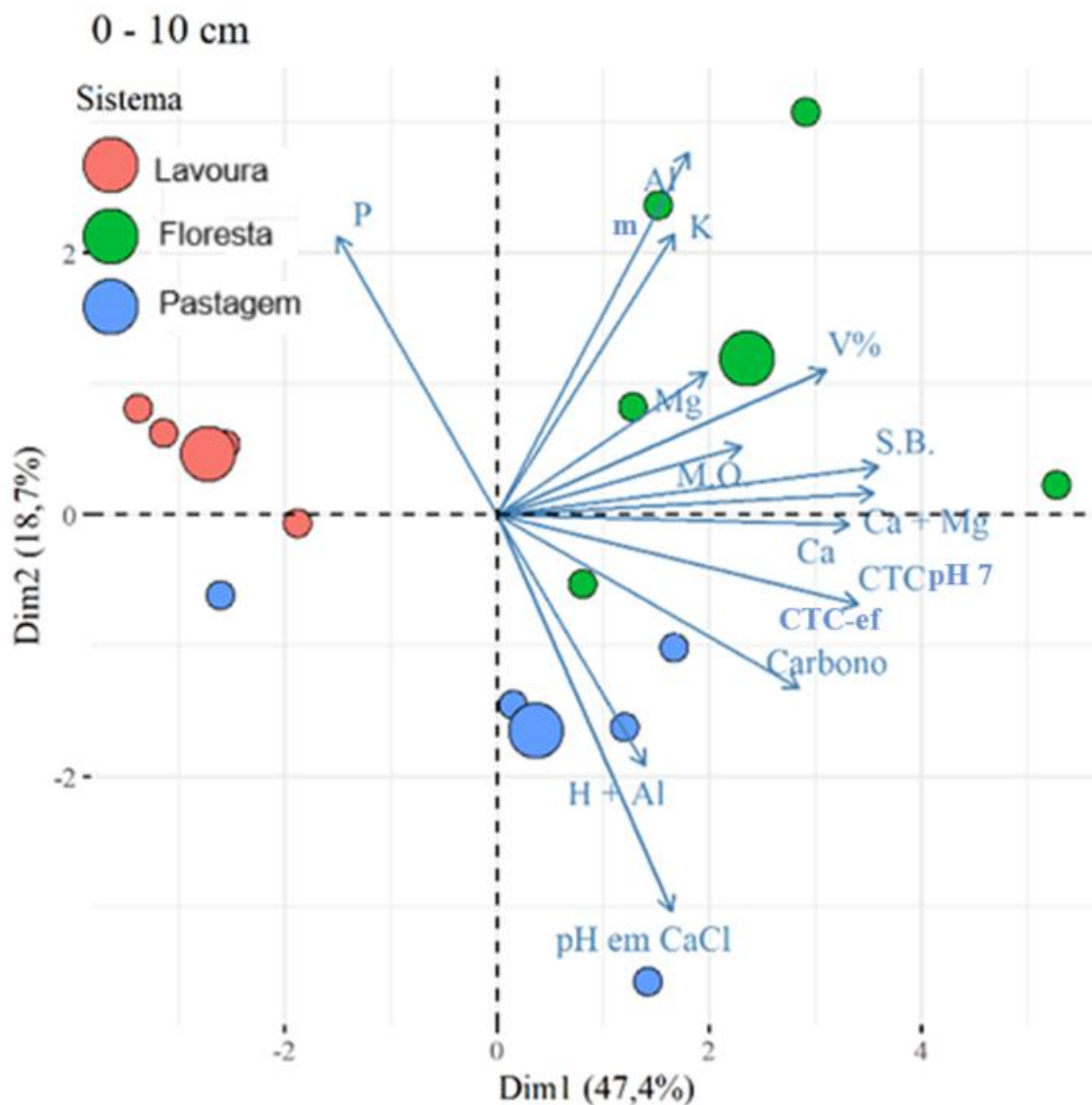


Figura 18. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos químicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm. Sendo: pH em CaCl: Potencial hidrogeniônico (CaCl_2 0,01 mol L^{-1}). MO: Matéria orgânica do solo. Carbono: Carbono orgânico total do solo. P: Fósforo. K: Potássio. Al: Alumínio. Ca: Cálcio. Mg: Magnésio. Ca+Mg: soma de cálcio e magnésio. H+Al: Acidez potencial. CTC-ef: Capacidade de troca catiônica efetiva. CTC pH 7: Capacidade de troca catiônica potencial. SB: Soma de bases. V%: Saturação por bases. m: Saturação de alumínio. Vermelha indica lavoura, verde indica floresta e azul indica pastagem.

Na análise de PCA, na profundidade de 0-10 cm, o primeiro eixo explicou 47,4% e o segundo eixo 18,7%, totalizando 66,1% da variância total dos dados.

Na profundidade de 0-10 cm, a lavoura apresentou um solo com características

associadas ao teor de P, o que se justifica pelo uso de adubação química nas culturas agrícolas. E o P tem correlação negativa com o pH e com H+Al, devido ao fato de o P ter sua disponibilidade alterada em função do pH, e que os teores de H+Al influenciam na acidez do solo.

A última aplicação de calagem na lavoura foi realizada há aproximadamente 8 anos, e a pastagem e floresta não tiveram correção do solo. Dessa forma, o pH e o H+Al relacionam-se ao solo da pastagem, o que é explicado pois nos resultados, a pastagem apresentou os maiores valores de pH, nas duas profundidades. Santos et al. (2024) destaca que o pH do solo pode diminuir devido ao uso do solo, através da exportação de nutrientes, o que justifica a lavoura não apresentar correlação positiva com o pH.

O carbono, a CTC-ef e a CTC pH 7 relacionam-se entre si para a floresta e pastagem, indicando que a maior presença de carbono resulta em cargas negativas na solução do solo, que promovem a sua fertilidade. Lal (2015) relata que o uso intensivo do solo, principalmente em cultivos agrícolas, ocorre a exportação de nutrientes do solo para as culturas, o que explica as bases estarem linearmente correlacionadas em sua maioria com a floresta.

Os atributos de Ca, Mg, MO, SB, V%, Al, m% e K apresentaram variáveis linearmente correlacionadas ao solo da floresta, Martins et al. (2023) destaca que a MO tem a capacidade de melhorar a ciclagem de nutrientes, o que justifica estarem linearmente correlacionadas no uso da floresta, onde os teores de MO foram mais altos. O Al, m% e K relacionam-se entre si, indicando que o teor de Al e a saturação de Al interferem na disponibilidade de K, principalmente em solos ácidos. Na floresta os níveis de Al ficaram acima de $1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ o que pode afetar o desenvolvimento das raízes, e a floresta e lavoura apresentaram saturação de Al acima de 20%.

A figura 19 apresenta a Análise de Componentes Principais (PCA) para os atributos químicos e os de usos do solo na profundidade de 10-20 cm.

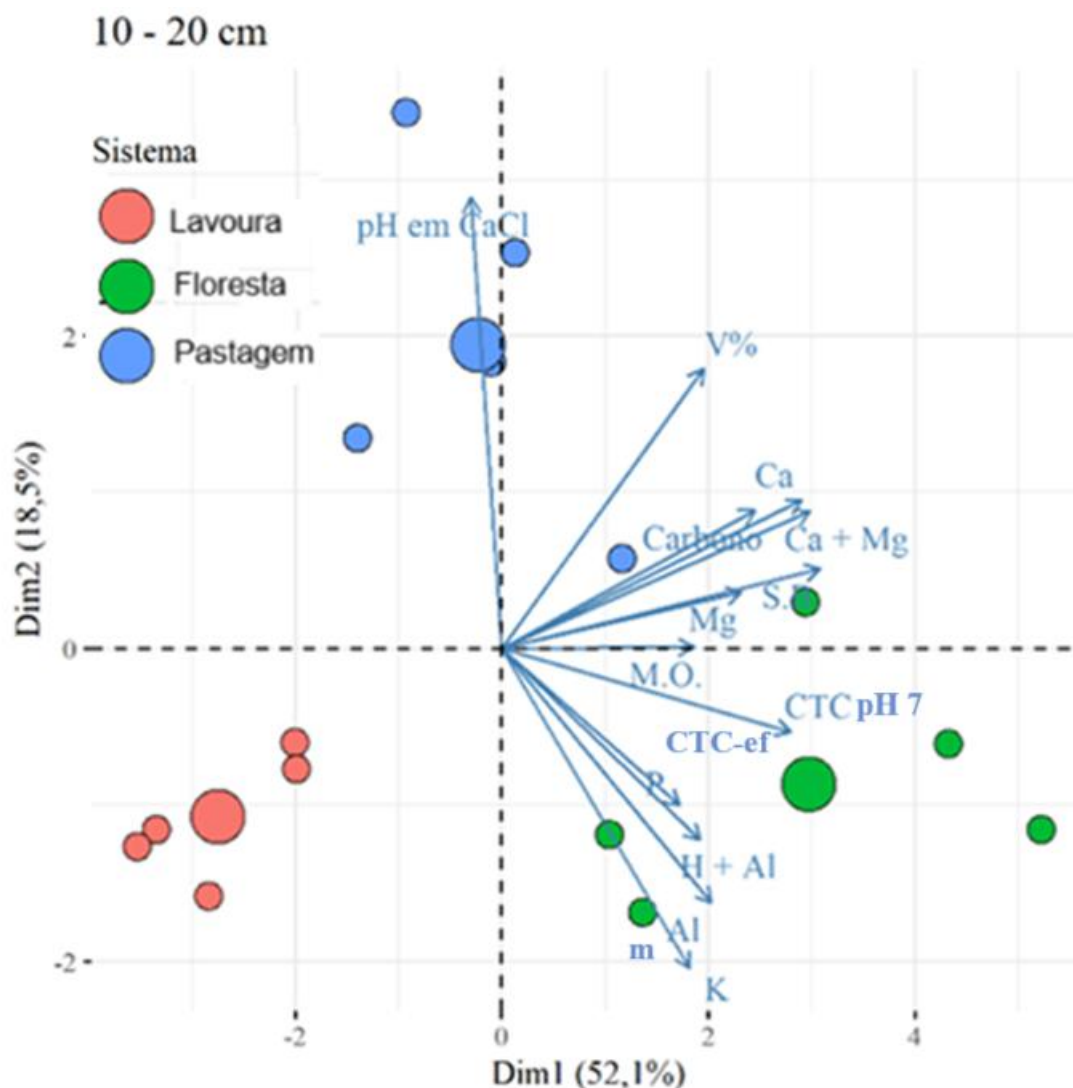


Figura 19. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos químicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 10-20 cm. Sendo: pH em CaCl: Potencial hidrogeniônico (CaCl_2 0,01 mol L^{-1}). MO: Matéria orgânica do solo. Carbono: Carbono orgânico total do solo. P: Fósforo. K: Potássio. Al: Alumínio. Ca: Cálcio. Mg: Magnésio. Ca+Mg: soma de cálcio e magnésio. H+Al: Acidez potencial. CTC-ef: Capacidade de troca catiônica efetiva. CTC pH 7: Capacidade de troca catiônica potencial. SB: Soma de bases. V%: Saturação por bases. m: Saturação de alumínio. Vermelha indica lavoura, verde indica floresta e azul indica pastagem.

Na análise de PCA, na profundidade de 10-20 cm, o primeiro eixo explicou 52,1% e o segundo eixo 18,5%, totalizando 70,6% da variância total dos dados.

Na profundidade de 10-20 cm, os atributos SB, MO, CTC-ef, CTC pH 7, P, H+Al, Al e K apresentaram variáveis linearmente correlacionadas ao solo da floresta, indicando que esse uso apresenta condições favoráveis para a manutenção da fertilidade natural do solo. Portugal et al. (2010) relata que os valores de CTC estão relacionados aos maiores valores de MO, observados principalmente nas áreas de florestas, o que justifica a correlação positiva apresentada.

Analisando as figuras 18 e 19, pode-se observar que o uso do solo tem impactos significativos nos atributos químicos e que eles agem de forma diferente dependendo da profundidade analisada, bem como, o pH demonstrou uma tendência de forte correlação com o uso da pastagem nas duas profundidades.

De uma forma geral, é possível observar que na profundidade de 0-10 cm, tanto para a pastagem quanto para a floresta os valores de Ca, Mg, SB, V% e MO apresentaram correlação entre si, e na profundidade de 10-20 cm, os valores de Ca, Mg, SB, V%, MO e COT apresentaram correlação entre si, o que se justifica pois o Ca e Mg influencia diretamente na SB e, conseqüentemente na V%, e a MO e o COT contribuem para a retenção de Ca e Mg no solo, o que indica que solos com altos valores de V% tendem a apresentar boa fertilidade.

Para a profundidade de 10-20 cm, a lavoura não apresentou potencial de correlação positiva com os atributos químicos, uma vez que o sistema lavoura está no eixo negativo da PCA, o que é justificado pelo manejo empregado na área da lavoura, a qual consiste em adubação em linha, com recomendação sem análise química e uso predominante de NPK.

A figura 20 apresenta a correlação de Pearson para os atributos químicos no uso da floresta que tiveram correlação acima de 0,65.

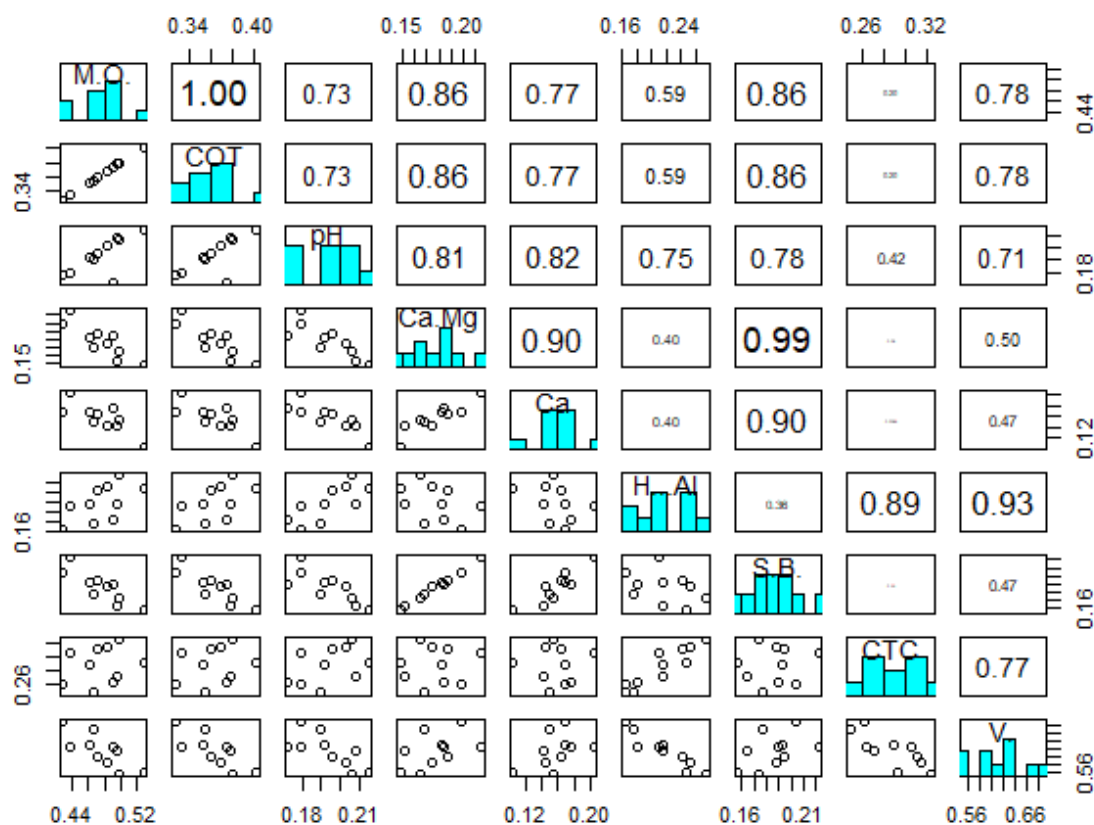


Figura 20. Correlação de Pearson dos atributos químicos do solo para a floresta.

Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. pH: potencial hidrogeniônico. Ca.Mg: soma de cálcio e magnésio. Ca: cálcio. H.Al: acidez potencial. S.B: soma de bases. CTC: capacidade de troca catiônica potencial. V: saturação de bases.

De acordo com a figura 20, a MO e o COT possuem correlação positiva no uso da floresta com o pH (0,73), Ca+Mg (0,86), Ca (0,77), SB (0,86) e V% (0,78), o que é corroborado pelo poder tampão do solo, que favorece a disponibilidade de bases.

O pH possui correlação positiva no uso da floresta com o Ca+Mg (0,81), Ca (0,82), H+Al (0,75), SB (0,78) e V% (0,71), indicando que solos com pH mais alto tendem a ter maior disponibilidade de nutrientes. O Ca+Mg possui correlação positiva no uso da floresta com o Ca (0,90), SB (0,99), o que já era esperado, devido à sua contribuição para o Ca e a SB, o que justifica o Ca possuir correlação positiva no uso da floresta com o SB (0,90).

O H+Al possui correlação positiva no uso da floresta com a CTC potencial (0,89) e V% (0,93), o que pode ser justificado pois a floresta apresenta maior teor de MO, que gera uma capacidade maior de reter e disponibilizar nutrientes, sugerindo que,

em solos florestais, a presença de H+Al pode coexistir com um equilíbrio dinâmico, sem impedir a disponibilidade de bases.

A CTC potencial possui correlação positiva no uso da floresta com a V% (0,77), isso ocorre porque solos com alta CTC potencial possuem maior retenção de cátions básicos, o que eleva a V%.

A figura 21 apresenta a correlação de Pearson para os atributos químicos no uso da pastagem que tiveram correlação acima de 0,65.

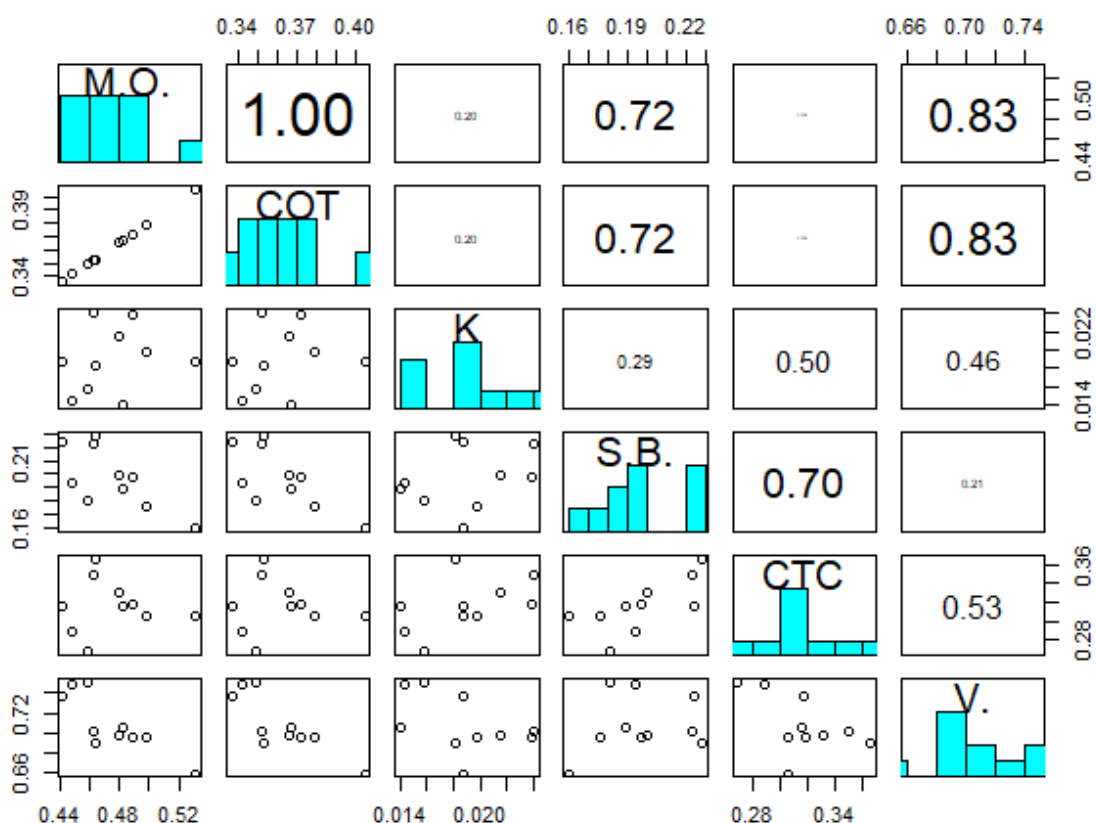


Figura 21. Correlação de Pearson dos atributos químicos do solo para a pastagem. Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. K: potássio. S.B: soma de bases. CTC: capacidade de troca catiônica potencial. V: saturação de bases.

De acordo com a figura 21, a MO e o COT possuem correlação positiva no uso da pastagem com a SB (0,72) e V% (0,83), indicando que quanto maior os teores de MO e COT, maior a disponibilidade de nutrientes, devido ao aumento da SB e V%.

A SB tem correlação positiva no uso da pastagem com a CTC potencial (0,70), o que pode ser justificado pois a SB é um dos componentes da CTC potencial.

A figura 22 apresenta a correlação de Pearson para os atributos químicos no uso da lavoura que tiveram correlação acima de 0,65.

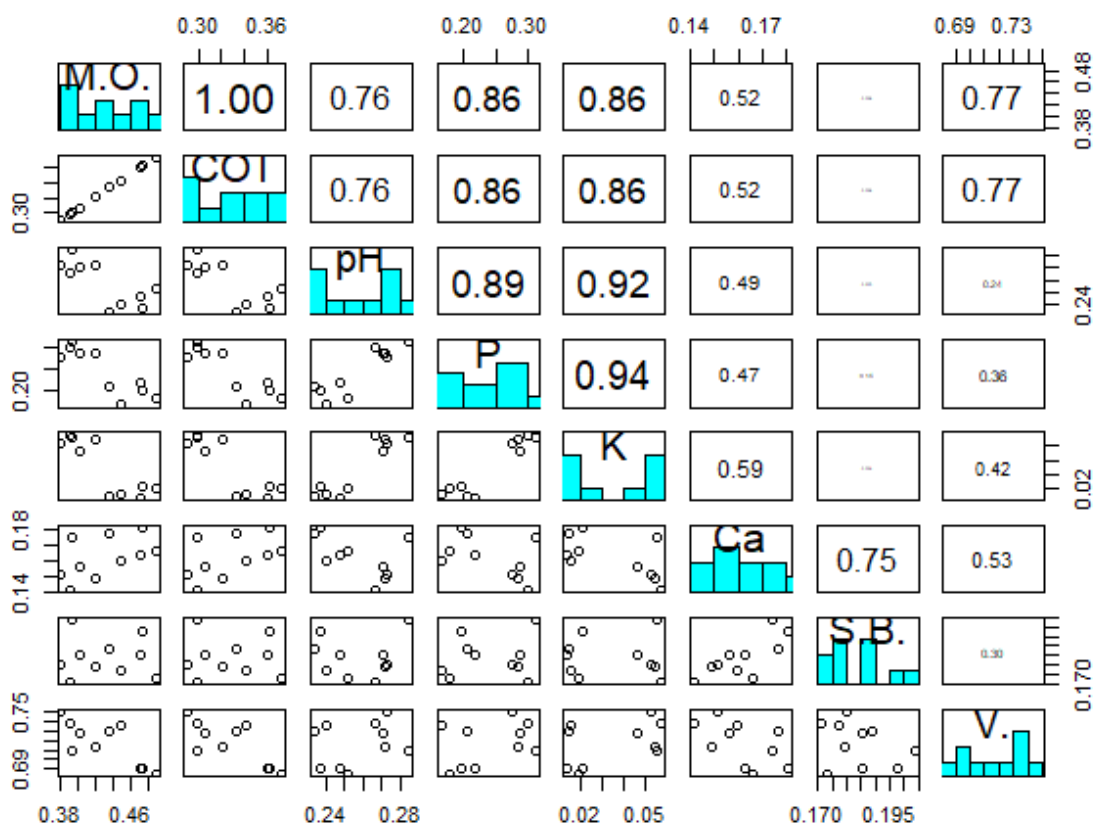


Figura 22. Correlação de Pearson dos atributos químicos do solo para a lavoura. Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. pH: potencial hidrogeniônico. P: fósforo. K: potássio. Ca: cálcio. S.B: soma de bases. V: saturação de bases.

De acordo com a figura 22, a MO e o COT possuem correlação positiva no uso da lavoura com o pH (0,76), P (0,86), K (0,86) e V% (0,77), indicando que a MO deixa o pH mais equilibrado, o que torna os nutrientes disponíveis.

O pH possui correlação positiva no uso da lavoura com o P (0,89) e com o K (0,92), reforçando que o aumento do pH aumenta a disponibilidade de nutrientes.

O P possui correlação positiva no uso da lavoura com o K (0,94), o que pode ser explicado pelo fato da lavoura receber adubação química com esses nutrientes. E o Ca possui correlação positiva no uso da lavoura com a SB (0,75), o que pode ser explicado pois o Ca é um dos componentes da SB.

Analisando as figuras 20, 21 e 22, a floresta apresenta mais correlações entre os atributos químicos e a MO e o COT do que a pastagem e lavoura, o que se justifica, pois, a floresta apresenta maiores teores de MO. O uso do solo afeta a fertilidade e a ciclagem de nutrientes (Shah; Wu, 2019), o que justifica os usos do solo analisados

apresentarem correlações distintas.

Os indicadores mais utilizados para avaliar a qualidade do solo incluem a matéria orgânica, pH, P, capacidade de armazenamento de água e nutrientes (Bünnemann et al., 2018).

A floresta possui correlação positiva entre a MO e COT com o pH, Ca+Mg, Ca, SB e V%. A pastagem possui correlação positiva entre a MO e COT com a SB e V%, resultado da ausência de reforma de pastagem e manejo inadequado. A lavoura possui correlação positiva entre a MO e COT com o pH, P, K e V%, justificado pela adubação química. De acordo com Curtin et al. (2016) a MO influencia na disponibilidade de nutrientes, aumentando a quantidade de bases trocáveis disponíveis.

O uso do solo impactou de forma mais intensa o uso da pastagem e lavoura. A pastagem não apresentou correlação entre o COT e pH e nenhum cátion isolado, apenas com a SB e V%, o que mostra que a sua fertilidade é influenciada pela extração de bases através da alimentação animal. Vale ressaltar que a pastagem apresentou a menor m%, com diferenças estatísticas entre a floresta e lavoura, mesmo seus teores de Al não se diferenciando estatisticamente da lavoura. Portanto, a pastagem não apresenta toxidez de Al.

A lavoura não apresentou correlação entre o COT e SB, o que mostra que a sua fertilidade é afetada pela extração de nutrientes na colheita, o que se justifica, pois, a coleta de dados foi realizada após a colheita da soja na área. A lavoura apresentou m% acima de 20%, o que indica toxidez para as plantas, e com o pH ácido, a disponibilidade de nutrientes é afetada, comprometendo a sua fertilidade e produtividade das culturas.

O uso e manejo do solo afetaram a sua fertilidade na pastagem e lavoura. Porém, a lavoura apresentou maiores impactos, indicando que o uso intensivo no solo causa degradação química e afeta a sua fertilidade.

6.6 CONCLUSÕES

O uso do solo apresentou impacto nos atributos químicos do solo. Todos os tratamentos apresentaram solo ácido, a MO e o COT foram maiores na floresta. A fertilidade foi menor na lavoura e pastagem, devido a exportação de nutrientes pela colheita e alimentação animal. A floresta apresentou maiores valores de matéria orgânica e carbono orgânico total, e mostrou-se mais eficaz na ciclagem de nutrientes

e manutenção da fertilidade. A floresta, pastagem e lavoura apresentaram correlação positiva entre o carbono orgânico total e saturação de bases, refletindo a sua influência na fertilidade do solo.

6.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711 – 728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: Conceitos, indicadores e avaliações. *Revista Brasileira de tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v.5, n.1, p.187-206, 2012. <https://doi.org/10.5777/paet.v5i1.1658>
- BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. *Revista Ceres*, v.62, p.301-309, 2015. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030010>
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, p.790, 2009.
- BÜNNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, Londres, v.120, p.105-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do Solo em Sistemas de Manejo Avaliada pela Dinâmica da Matéria Orgânica e Atributos Relacionados. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v.29, p.777-778, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000500013>
- CORDEIRO, C.; ECHER, F.; ARAÚJO, F. Cover crops impact crops yields by improving microbiological activity and fertility in sandy soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v.21, p.1968-1977, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00494-0>
- COUTINHO, F. S.; PEREIRA, M. G.; MENEZES, C. E. G.; GUARESCHI, R. F.; ASSUNÇÃO, S. A. Atributos edáficos em áreas de agricultura, pastagem e três estágios sucessionais de floresta. *Floresta e Ambiente*, v.24, n.4, p.1-11, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.091914>
- CURTIN, D.; PETERSON, M.; ANDERSON, C. pH-dependence of organic matter solubility: Base type effects on dissolved organic C, N, P, and S in soils with contrasting mineralogy. *Geoderma*, v.271, p.161-172, 2016. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2016.02.009>
- CRUZ, I.; OLIVEIRA, L. J.; OLIVEIRA, A. C.; VASCONCELOS, C. A. Efeito do nível de saturação de alumínio em solo ácido sobre os danos de *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) em milho. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, v.25, n.2, p.293-297, 1996.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. D.; BALIEIRO, F. D. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1003-1020, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. Defining soil quality for sustainable environment. Madison: Soil Science Society of America, v.35, p.3-21, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (org.). Manual de Métodos de Análise de Solo. Brasília, DF: Embrapa, 3. ed., p.577, 2017.

FERREIRA, P. L. S.; PEREIRA, F. O.; MORAES, J. O. B.; DUTRA, D. T.; AMARAL, J.; FERREIRA, A. M. Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v.13, p.581–589, 2018. <https://doi.org/10.18378/rvads.v13i5.6246>

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono Orgânico (Cáp. 1). In: Manual de métodos de análise de solo. Brasil, Embrapa-RJ, p.360–367, 2017.

HINSINGER, P.; BELL, M. J.; KOVAR, J. L. Rhizosphere processes and root traits determining the acquisition of soil potassium. In: BELL, M. J.; THOMPSON, M. L.; MOODY, P. W. (Eds.). Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops. Springer, p.115-143, 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Divisão Territorial Brasileira – DTB, 2020.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. Agriculture, Ecosystems & Environment, v.79, n.1, p.9-16, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0)

ISLAM, M.; SIDDIQUE, K. H.; PADHYE, L. P.; PANG, J.; SOLAIMAN, Z. M.; HOU, D.; BOLAN, N. A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves. Advances in Agronomy, v.185, p.153-249, 2024. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v.19, n.3, p.395-401, 1995.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability, v.7, n.5, p.5875-5895, 2015. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, v.304, n.5677, p.1623-1627, 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

LEPSCH, I. F. 19 Lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, p.456, 2011.

MARTINS, T. S.; DA CUNHA, J. M.; BRITO, W. B. M.; SANTOS, R. V.; DE LIMA, A. F. L.; DE SOUZA, F. G.; CAMPOS, M. C. C.; FILHO, E. G. B.; OLIVEIRA, F. P. Distribuição espacial anisotrópica de atributos químicos do solo em agroecossistemas e floresta nativa em Canutama, Sul do Amazonas. Revista Brasileira de Geografia Física, v.16, n.3, p.1629-1646, 2023.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. D. F.; ZEMPULSKI, H. D. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR. (Circular, 76), p.38, 1992.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.2, p.575-585, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200032>

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. Guia de interpretações de análise de solo e foliar, 2013.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <<http://www.R-project.org>> Acesso em out. 2024.

RAMOS, H. M. M.; DE SOUSA, R. S.; NUNES, L. A. P. L.; MATOS FILHO, C. H. A.; DE MOURA, J. S. Estoque de carbono de um neossolo quartzarênico sob diferentes usos: Carbon stock in a quartzarenic neosol under different land uses. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v.6, n.1, p.910-922, 2023. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n1-080>

REICHERT, J. M.; AMADO, T.; REINERT, D.; RODRIGUES, M. F.; SUZUKI, L. E. A. S. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandization/desertification processes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.233, p.370-380, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.039>

RIBEIRO, P. H.; DOS SANTOS, J. V. V. M.; COSER, S. M.; NOGUEIRA, N. O.; MARTINS, C. A. S. Adubação verde, os estoques de carbono e nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica do solo. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.6, n.1, p.43-50, 2011. <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/476>

SÁNCHEZ-NAVARRO, V.; ZORNOZA, R.; FAZ, A.; FERNANDEZ, J. A. Comparison of soil organic carbon pools, microbial activity and crop yield and quality in two vegetable multiple cropping systems under Mediterranean conditions. *Scientia Horticulturae*, v.261, p.109025, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109025>

SANTOS, A. C. A.; JUNIOR, O. B. P.; FINGER, A. Impacts of burning on nutrient availability in the soil of the Chapada dos Guimarães National Park – MT. *Seven Editora*, p.49–67, 2024. Disponível em: <<https://sevenpublicacoes.com.br/editora/article/view/5353>>. Acesso em: nov. 2024.

SHAH, F.; WU, W. Soil and Crop Management Strategies to Ensure Higher Crop Productivity within Sustainable Environments. *Sustainability*, v.11, n.5, p.1485, 2019. <https://doi.org/10.3390/SU11051485>

SILVA, C.F.; PEREIRA, M.G.; MIGUEL, D.L.; FERNANDES, J.C.F.; LOSS, A.; MENEZES, C.E.G. Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio vale do paraíba

do sul (RJ). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.36, n.6, p.1680-1689, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000600002>

SILVA, G. F. D.; SANTOS, D.; SILVA, A. P. D.; SOUZA, J. M. D. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. Revista Caatinga, v.28, n.3, p.25-35, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n303rc>

TANG, C.; WELIGAMA, C.; SALE, P. Subsurface soil acidification in farming systems: its possible causes and management options. In: XU, J.; SPARKS, D. (eds). Molecular Environmental Soil Science. Progress in Soil Science. Springer, 2013. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4177-5_13

TEIXEIRA, I. R.; SOUZA, C. M. D.; BORÉM, A.; SILVA, G. F. D. Variação dos valores de pH e dos teores de carbono orgânico, cobre, manganês, zinco e ferro em profundidade em Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes sistemas de preparo de solo. Bragantia, v.62, p.119-126, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100015>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solos. 3.ed. Revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, p.573, 2017.

ZAJÍCOVÁ, K.; CHUMAN, T. Effect of land use on soil chemical properties after 190 years of forest to agricultural land conversion. Soil & Water Research, v.14, n.3, p.121-131, 2019. <https://doi.org/10.17221/5/2018-SWR>

7 CAPÍTULO 3 - ARTIGO C: RELAÇÃO DO USO DO SOLO E ATIVIDADE MICROBIANA DE UM SOLO ARENOSO

7.1 RESUMO

As mudanças de uso do solo têm causado degradação especialmente em solos arenosos devido aos impactos do manejo nas características químicas e biológicas, reduzindo o conteúdo de carbono orgânico total e diminuindo a atividade microbiana. O objetivo do estudo foi avaliar a relação entre os atributos biológicos, carbono orgânico total e os usos de lavoura, pastagem e floresta, de um solo arenoso. A área de estudo está localizada no município de Rio Branco do Ivaí - PR, com três tipos de uso, lavoura, pastagem e floresta nativa. Foram avaliadas a matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico (qCO_2). O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) entre as três áreas, com cinco repetições cada, os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA e comparados pelo teste Tukey (5%), análise de componentes principais (PCA) e correlação de Pearson entre as variáveis para cada uso do solo. O COT apresentou maiores valores na floresta e pastagem, a mesma tendência se observa no NBM, corroborando com a hipótese de o manejo influenciar na qualidade do solo, pois esse indicador é sensível ao manejo, e maior respiração basal na floresta, evidenciando a maior atividade microbiana em solos de floresta nativa. A lavoura apresentou os piores indicadores de MO, COT e biológicos, enfatizando que práticas de cultivo intensivo afetam a qualidade do solo, influenciando na fertilidade natural, microbiota e ciclagem de nutrientes. A RBS foi maior na floresta, com diferenças estatísticas entre a pastagem e lavoura, indicando alta atividade microbiana e rápida decomposição da MO, o que demonstra que a área de floresta não é um ambiente totalmente estável e protegido, pois recebe perturbações antrópicas, devido a entrada de animais e supressão vegetal, e que pode ocorrer perda de COT a longo prazo. Portanto, o uso do solo afeta os teores de COT, que afetam a atividade microbiana, e conseqüentemente, influenciam na qualidade biológica do solo. A floresta possui correlação positiva entre a MO e COT com o CBM e NBM. A pastagem possui correlação positiva entre a MO e COT com o CBM, RBS e qCO_2 . A lavoura possui correlação positiva entre a MO e COT com o CBM, NBM, RBS e qCO_2 . Conclui-se que o uso do solo apresentou impacto nos atributos biológicos do solo.

Palavras-chave: qualidade do solo, matéria orgânica, microrganismos do solo, microbiota, manejo do solo.

7.2 ABSTRACT

Land use changes have caused degradation especially in sandy soils due to the impacts of management on chemical and biological characteristics, reducing the total organic carbon content and decreasing microbial activity. The objective of the study was to evaluate the relationship between biological attributes, total organic carbon and crop, pasture and forest uses of a sandy soil. The study area is in the municipality of Rio Branco do Ivaí - PR, with three types of use, crop, pasture and native forest. Organic matter (OM), total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), soil basal respiration (SBR) and metabolic quotient (qCO_2) were evaluated. The experiment was carried out using a completely randomized design (CRD) between the three areas, with five replicates each. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and compared by the Tukey test (5%), principal component analysis (PCA) and Pearson correlation between the variables for each land use. The TOC showed higher values in the forest and pasture, the same trend was observed in the NBM, corroborating the hypothesis that management influences soil quality, since this indicator is sensitive to management, and greater basal respiration in the forest, evidencing the greater microbial activity in native forest soils. The crop presented the worst OM, TOC and biological indicators, emphasizing that intensive cultivation practices affect soil quality, influencing natural fertility, microbiota and nutrient cycling. The RBS was higher in the forest, with statistical differences between pasture and cropland, indicating high microbial activity and rapid decomposition of OM, which demonstrates that the forest area is not a totally stable and protected environment, as it receives anthropogenic disturbances, due to the entry of animals and plant suppression, and that TOC loss may occur in the long term. Therefore, land use affects TOC levels, which affect microbial activity, and consequently, influence the biological quality of the soil. The forest has a positive correlation between OM and TOC with CBM and NBM. Pasture has a positive correlation between OM and TOC with CBM, RBS and qCO_2 . Cropland has a positive correlation between OM and TOC with CBM, NBM, RBS and qCO_2 . It is concluded that land use has an impact on the biological attributes of the soil.

Keywords: soil quality, organic matter, soil microorganisms, microbiota, soil management.

7.3 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a demanda por alimentos e a exploração dos recursos naturais, reduzem a capacidade do solo em manter em ordem o seu ecossistema natural (Nascimento et al., 2019). O uso intensivo do solo em sistemas agropecuários tem causado diminuição nos níveis de matéria orgânica (Souza et al., 2023), e por consequência, redução do carbono orgânico do solo.

O uso intensivo e manejo inadequado do solo resultam em uma perda significativa de carbono orgânico devido à perda de matéria orgânica. Essas perdas podem chegar em até 60%, especialmente em solos arenosos onde a matéria orgânica é mais facilmente decomposta (Jolivet et al., 2003). Portanto, a textura do solo influencia significativamente a dinâmica do carbono orgânico do solo. Em solos arenosos a matéria orgânica é mais suscetível à decomposição devido à menor proteção física contra a atividade microbiana (Rawls et al., 2003).

A qualidade biológica do solo é fundamental para a sustentabilidade agrícola e a saúde dos ecossistemas. Práticas de manejo influenciam diretamente a composição e atividade da comunidade microbiana, afetando a capacidade do solo de sustentar a produção agrícola (Demeter, 2018).

A qualidade biológica do solo é um indicador sensível das práticas de manejo (Crecchio et al., 2004). Os principais bioindicadores utilizados para avaliar a qualidade biológica do solo incluem o carbono da biomassa microbiana, o nitrogênio da biomassa microbiana, o quociente metabólico e a respiração basal do solo. Esses parâmetros demonstram a dinâmica microbiana do solo e fornecem informações sobre a atividade e a saúde da atividade microbiana no solo. A avaliação desses índices pode detectar mudanças na qualidade do solo antes que alterações no carbono orgânico total sejam observáveis (Wang et al., 2021).

Os efeitos da degradação do solo, principalmente em solos arenosos, são um grande desafio. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar a relação entre os atributos biológicos, carbono orgânico total e os usos de lavoura, pastagem e floresta, de um solo arenoso.

7.4 MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada encontra-se no município de Rio Branco do Ivaí - PR (24°20'16,139" S e 51°18'17,957" W) com altitude média de 650 m, localizado na Região Norte Central Paranaense (IBGE, 2020). O clima é caracterizado como subtropical úmido Cfa, conforme a classificação de Köppen-Geiger com temperaturas médias de 20°C e precipitação média anual de 1650 mm (Alvares et al., 2013).

As áreas selecionadas para este estudo foram: 1) lavoura, culturas agrícolas temporárias com mais de 10 anos de plantio direto e sem rotação de culturas; 2) pastagem extensiva, com mais de 10 anos de pastejo e sem reforma; e 3) floresta nativa.

As coletas e análises do solo foram realizadas conforme o Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos (Embrapa, 2017). Para a caracterização e a avaliação química e biológica do solo, foram selecionados 5 pontos de coleta em cada área, para a química utilizou-se as profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm e para a biológica utilizou-se apenas a profundidade de 0-10 cm.

A determinação da matéria orgânica de acordo com a metodologia descrita por Pavan et al. (1992) e o carbono orgânico total foi determinado pelo método Walkley-Black proposto por Fontana; Campos (2017).

O carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana foram extraídos pelo método de fumigação-extração, proposto por Vance et al. (1987). A respiração basal do solo foi determinada pelo método da incubação, proposto por Jenkinson; Powlson (1976) e adaptado por Silva et al. (2007). O quociente metabólico foi calculado de acordo com Anderson; Domsch (1993).

O experimento foi realizado utilizando-se o delineamento experimental inteiramente causalizado (DIC) entre as três áreas, com cinco repetições cada. Os dados foram comparados pelo teste ANOVA seguido de Tukey a 5% de probabilidade. Para ordenação dos dados utilizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) e a análise de correlação de Pearson entre a matéria orgânica e carbono orgânico total e os atributos físicos, químicos e biológicos, entre as variáveis para cada uso do solo. A estatística foi realizada no software R (R Development Core Team, 2024).

7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 8 são apresentados os valores de carbono orgânico total (COT) e

matéria orgânica (MO), para os usos de floresta, pastagem e lavoura, em duas camadas de profundidade (0-10 cm e 10-20 cm).

Tabela 8. Teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT) para os usos de floresta, pastagem e lavoura, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

Tratamento	MO ⁽¹⁾ g kg ⁻¹	COT ⁽²⁾ g kg ⁻¹
Profundidade 0-10 cm		
Floresta	26,51a*	15,38a
Pastagem	18,03b	10,46b
Lavoura	8,63c	5,01c
CV (%)	11,63	11,63
p-valor	p<0,001	p<0,001
Profundidade 10-20 cm		
Floresta	24,03a	13,94a
Pastagem	16,77b	9,73b
Lavoura	8,17c	4,74c
CV (%)	2,79	2,79
p-valor	p<0,001	p<0,001

¹ Matéria orgânica do solo (g kg⁻¹). ² Carbono orgânico total (g kg⁻¹). *Valores seguidos da mesma letra minúscula na vertical, para a mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

De acordo com a tabela 8, a MO foi maior na floresta, diferindo estatisticamente da pastagem e lavoura, apresentando na profundidade 0-10 cm, 26,51 g kg⁻¹, e na profundidade de 10-20 cm, com 24,03 g kg⁻¹. Os valores observados estão de acordo com o esperado, com a floresta apresentando os maiores valores, indicando um ambiente saudável para a manutenção da MO. Chávez et al. (2011) destaca que o teor de MO no solo depende do balanço entre as taxas de adição e perda e da respiração basal do solo.

O teor de COT foi maior na floresta, diferindo estatisticamente da pastagem e lavoura, apresentando na profundidade 0-10 cm, 15,38 g kg⁻¹, e na profundidade de 10-20 cm, com 13,94 g kg⁻¹, indicando que o uso com cultivo agrícola favorece a perda de COT para o ambiente.

A vegetação nativa, como a encontrada em áreas de floresta, contribuiu para a manutenção de altos níveis de MO e COT. Segundo Rangel-Vasconcelos et al. (2015) a floresta favorece a atividade microbiana que desempenha um papel crucial na ciclagem de nutrientes e na manutenção dos níveis de COT.

A qualidade biológica é um indicador fundamental da saúde do solo e é influenciada pelo seu uso. A tabela 9 apresenta os indicadores da qualidade biológica do solo na profundidade de 0-10 cm para floresta, pastagem e lavoura.

Tabela 9. Indicadores da qualidade biológica do solo para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm.

Tratamento	CBM ⁽¹⁾	NBM ⁽²⁾	qCO ₂ ⁽³⁾	RBS ⁽⁴⁾
	mgC kg ⁻¹ solo ⁻¹	mgN kg ⁻¹ solo ⁻¹	mgC-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹	mgC-CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹
Profundidade 0-10 cm				
Floresta	421,17a*	25a	48,81a	20,13a
Pastagem	317,65a	17a	37,71a	11,01b
Lavoura	226,99a	5b	53,08a	12,15b
CV (%)	36,28	16,06	30,58	13,28
p-valor	0,065	p<0,001	0,481	0,019

¹ Carbono da biomassa microbiana (mgC kg⁻¹ solo⁻¹). ² Nitrogênio da biomassa microbiana (mgN kg⁻¹ solo⁻¹). ³ Quociente metabólico (mgC-CO₂ g⁻¹ CBM h⁻¹). ⁴ Respiração basal do solo (mgC-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹). *Valores seguidos da mesma letra minúscula na vertical, para a mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Os indicadores biológicos carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), quociente metabólico (qCO₂) e respiração basal do solo (RBS) foram analisados apenas na profundidade de 0-10 cm, pois é nessa profundidade que ocorre a maior atividade microbiana. Vasconcelos (2010) relata que nas camadas mais profundas, são observadas condições desfavoráveis para a atividade microbiana, incluindo a redução na aeração do solo e uma menor disponibilidade de MO facilmente decomposta, fatores que impactam nos valores de CBM e NBM. Vale ressaltar que as coletas de solo foram realizadas após a colheita da soja, o que corrobora com os resultados encontrados na lavoura.

A biomassa microbiana tem sido empregada como um indicador biológico em pesquisas relacionadas ao fluxo de carbono e nitrogênio, produtividade do solo, ciclagem de nutrientes e investigações sobre o controle da transformação da matéria orgânica no solo (D'Andrea et al., 2002).

Altos valores de CBM indicam uma biomassa microbiana mais rica e ativa, de acordo com a tabela 9, o CBM não apresentou diferenças significativas entre os usos. Em valores absolutos, a área de floresta apresentou valores de CBM de 421,17 mgC kg⁻¹ solo⁻¹, seguida pela pastagem com 317,65 mgC kg⁻¹ solo⁻¹ e, por último, a lavoura com 226,99 mgC kg⁻¹ solo⁻¹.

Em valores absolutos, a lavoura apresentou o menor valor de CBM em comparação a floresta e pastagem, o que é compatível com o estudo de D'Andrea et al. (2002), no qual os autores identificaram valores superiores de CBM em pastagens quando comparados aos encontrados em culturas anuais. Alves et al. (2011) encontrou níveis próximos de CBM em áreas de pastagem, com valores de 258 mgC kg⁻¹ solo⁻¹.

O valor de CBM encontrado na pastagem comparado com a área de lavoura pode ser explicado pois em regiões de pastagem, é observado um significativo teor de MO e uma densa massa radicular, o que propicia condições favoráveis para a presença de uma considerável biomassa microbiana na rizosfera (Alves et al., 2011). O manejo intenso dos usos agrícolas frequentemente resulta em redução do CBM devido à remoção da vegetação nativa e práticas de manejo que afetam a microbiota do solo (Islam; Weil, 2000; Anderson; Domsch, 1980).

O resultado do NBM para a floresta apresentou o maior valor de 25 mgN kg⁻¹ solo⁻¹, seguido pelo uso de pastagem com 17 mgN kg⁻¹ solo⁻¹ e o menor valor para a lavoura com 5 mgN kg⁻¹ solo⁻¹, sendo que apenas a lavoura se diferenciou estatisticamente da floresta e pastagem.

Os valores de NBM mais elevados na floresta e pastagem indicam que esses solos funcionam como reservatórios naturais de nutrientes, incluindo o nitrogênio. Menores níveis de NBM indicam que a quantidade de nitrogênio disponível para os microrganismos é baixa, o que pode limitar seu crescimento e atividade, resultando em menor respiração basal.

O solo da lavoura apresenta os menores níveis de NBM, o que pode indicar uma redução na atividade microbiana e menor disponibilidade de nitrogênio e segundo Wardle (1992) o uso intensivo das práticas agrícolas pode empobrecer o solo, alterar a ciclagem de nutrientes e reduzir a disponibilidade de nutrientes essenciais para a microbiota do solo.

A relação de CBM e NBM é de 16,85, 18,69 e 45,40 para a floresta, pastagem e lavoura, respectivamente, sendo que a lavoura apresenta a maior relação, o que pode indicar que a imobilização do N é favorecida pelos microrganismos do solo, que influenciam na qualidade da MO.

O qCO₂ é um indicador da eficiência metabólica da microbiota do solo, um valor mais alto sugere que a microbiota está sob estresse e gastando mais energia para manter sua biomassa do que para crescimento (Anderson, 2003). O quociente metabólico não apresentou diferença estatisticamente entre os tratamentos. De acordo com Insam; Haselwandter (1989) os valores semelhantes de qCO₂ podem indicar menor qualidade e baixa quantidade de MO disponível no solo.

Além disso, o qCO₂ no solo da lavoura de 53,08 mgC-CO₂ g⁻¹ CBM h⁻¹, pode estar ligada a práticas agrícolas, como o uso de fertilizantes, perturbação do solo e cultivo de sucessão de culturas, que podem acelerar a decomposição da MO,

resultando em uma liberação mais intensa de CO₂, com a mesma tendência no uso da floresta e pastagem com 48,81 e 37,71 mgC-CO₂ g⁻¹ CBM h⁻¹, respectivamente.

A floresta apresentou o maior valor de RBS, com 20,13 mgC-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ diferindo estatisticamente da pastagem e lavoura. Valores elevados de RBS podem estar associados a uma alta atividade microbiana devido à maior disponibilidade de MO. A RBS consiste na agregação de todas as atividades metabólicas que resultam na produção de dióxido de carbono (CO₂).

Parker; Sansó (2023) destacam que a presença de MO e a menor perturbação do solo em áreas de floresta podem sustentar uma maior biodiversidade microbiana e aumentar valores da RBS. A RBS está associada a atividade microbiana, e seus valores mais altos podem indicar rápida decomposição da MO, o que resulta em perda de COT a longo prazo. Segundo Emadi et al. (2020) as pastagens também podem promover condições favoráveis para a atividade microbiana, o que é refletido na RBS, o que não acontece nos resultados em decorrência do manejo adotado na pastagem.

De acordo com Zhao; Efremova (2023) a intensificação do uso do solo na agropecuária pode afetar a RBS devido à compactação e à redução da MO. Para Bongiorno et al. (2019), sistemas intensivos de manejo e baixo aporte de MO, apresentam baixas taxas de RBS, que afetam a qualidade do solo.

As práticas agrícolas podem danificar a estrutura do solo e reduzir os habitats microbianos, levando a uma menor atividade microbiana (Pankhurst et al., 1997), o que também acontece em pastagens compactadas. Esses distúrbios físicos contribuem para os menores valores atividade microbiana, uma vez que os microrganismos dependem de um ambiente estável para seu desenvolvimento.

Ainda, o uso de adubação química e defensivos agrícolas na lavoura pode afetar negativamente a microbiota do solo, diminuindo a diversidade e a quantidade de microrganismos (Van Bruggen; Semenov, 2000). Marques et al. (2022) ressaltaram que doses mais altas de fertilização fosfatada foram associadas a reduções no CBM e RBS, o que resultou em uma menor biomassa microbiana e, conseqüentemente, menor RBS, refletindo uma atividade biológica reduzida.

A floresta se diferenciou estatisticamente da pastagem e lavoura apenas na RBS e se diferenciou estatisticamente da lavoura no NBM, indicando que a área de floresta não é um ambiente totalmente estável e protegido, o que pode ser justificado devido a perturbações antrópicas, como a entrada de animais, pois não existe cerca entre a área de mata e pastagem, e ocorre a supressão vegetal por falha nas áreas

de divisa e por ação antrópica, como forma de aumentar a área de pastagem.

A figura 23 apresenta a análise de PCA para os atributos biológicos e os usos do solo na profundidade de 0-10.

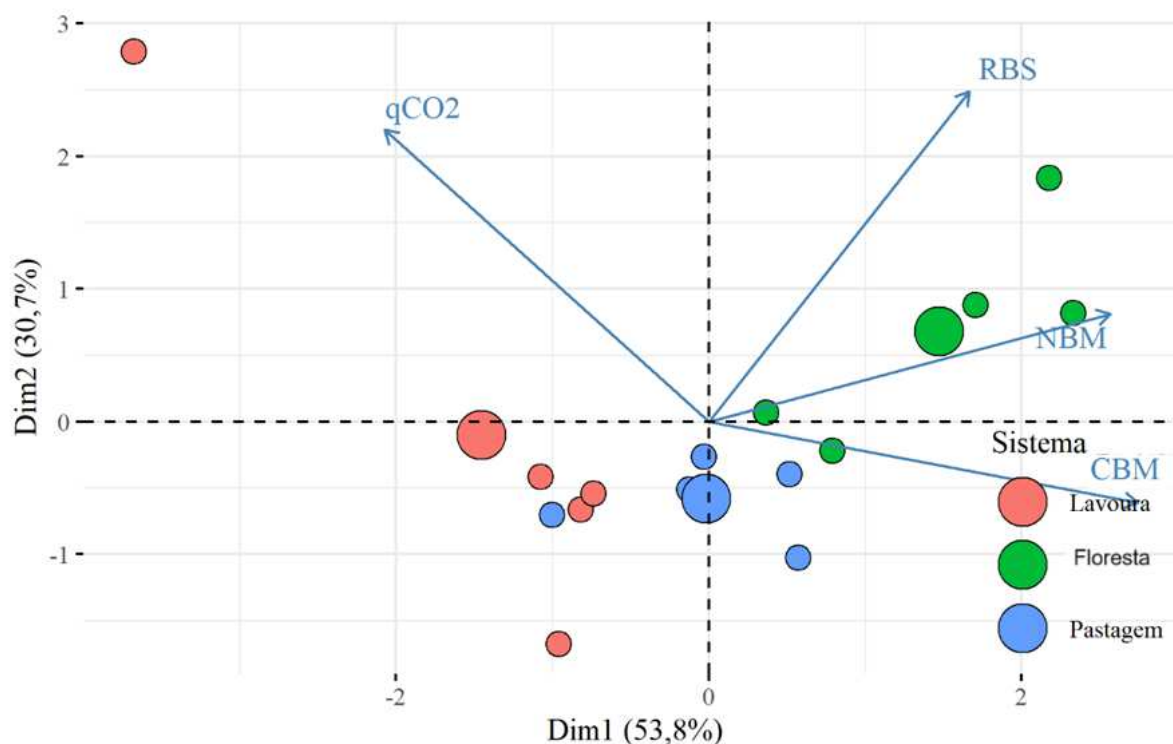


Figura 23. Análise de PCA (Análise de componentes principais) dos atributos biológicos para os usos de floresta, pastagem e lavoura, na profundidade de 0-10 cm. Sendo: CBM: Carbono da biomassa microbiana. NBM: Nitrogênio da biomassa microbiana. qCO₂: quociente metabólico. RBS: Respiração basal do solo. Vermelha indica lavoura, verde indica floresta e azul indica pastagem.

Na análise de PCA dos atributos biológicos, o primeiro eixo explicou 53,8% e o segundo eixo 30,7%, totalizando 84,5% da variância total dos dados.

O CBM, NBM e RBS apresentam variáveis linearmente correlacionadas entre si, principalmente no solo da floresta, o que se justifica, pois, esses atributos indicam a atividade microbiana do solo, e quanto maior seu valor, indica melhor fertilidade. E de forma negativa para a lavoura, Zhao; Efremova (2023) destacam que o uso intensivo do solo com lavoura impacta na RBS. E de modo gradual para a pastagem, uma vez que se observa que esse sistema se encontra com características similares ao seu posicionamento na ordenação.

De acordo com Islam et al. (2000), uma alta taxa de respiração basal do solo

pode ser indicativa tanto de um distúrbio no agrossistema quanto de um elevado nível de produtividade. Normalmente, a maior liberação de CO₂ está vinculada a uma atividade biológica mais intensa, estando diretamente relacionada à quantidade de carbono presente (Cunha et al., 2011). Comparando com os resultados encontrados, o carbono orgânico total não diferiu estatisticamente entre a floresta e pastagem, e a respiração basal do solo foi maior na floresta, apresentando diferenças significativas. Wang et al., (2003) destaca que áreas florestais e áreas com cobertura de vegetação apresentam maior atividade microbiana devido a maior quantidade de MO.

No entanto, a interpretação dos resultados da respiração basal do solo deve ser feita com cautela, pois valores elevados, a longo prazo, podem representar a perda de carbono orgânico do solo para a atmosfera (Souza et al., 2010).

O qCO₂ indica a eficiência metabólica dos microrganismos, por isso, ele não apresenta variáveis linearmente correlacionadas entre os demais atributos analisados. O qCO₂ apresenta variáveis linearmente correlacionadas com o uso da lavoura, indicando baixa qualidade do solo, e que nesse uso, os microrganismos estão em estresse ambiental. O NBM e a RBS apresentaram variáveis linearmente correlacionadas com a floresta, indicando um ambiente mais estável. De acordo com Sradnick et al. (2014) também observaram que áreas com menores teores de MO e uso intensivo apresentaram relação com a respiração microbiana

Também é possível observar que a variável qCO₂ apresentou para a lavoura maior linearidade oposta ao CBM, indicando que nesse uso do solo há estresse ambiental e pode indicar MO de baixa qualidade.

A figura 24 apresenta a correlação de Pearson para os atributos biológicos no uso da floresta que tiveram correlação acima de 0,65.

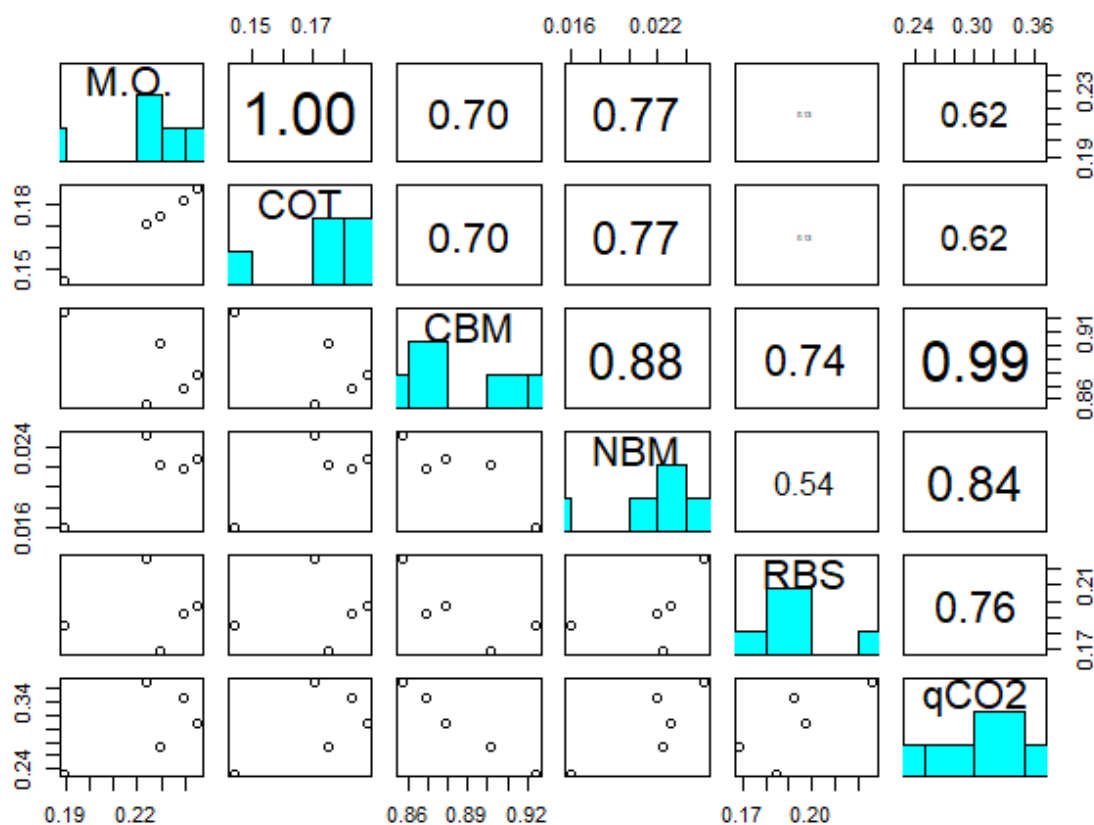


Figura 24. Correlação de Pearson dos atributos biológicos do solo para a floresta. Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. CBM: carbono da biomassa microbiana. NBM: nitrogênio da biomassa microbiana. RBS: respiração basal do solo. qCO₂: quociente metabólico.

De acordo com a figura 24, a MO e o COT possuem correlação positiva no uso da floresta com o CBM (0,70), NBM (0,77), pois a MO é a principal fonte de C e N para os microrganismos do solo, indicando que solos com altos níveis de MO irão apresentar alta atividade biológica. Porém, em solos arenosos, onde a MO é menos estável, isso pode levar a uma perda acelerada de COT.

O CBM possui correlação positiva no uso da floresta com o NBM (0,88), RBS (0,74) e qCO₂ (0,99).

O NBM possui correlação positiva no uso da floresta com o qCO₂ (0,84), o que sugere que, embora o N seja essencial para a biomassa microbiana, a eficiência de uso do COT pode ser reduzida em ambientes onde a qualidade da MO é baixa.

A RBS possui correlação positiva no uso da floresta com o qCO₂ (0,76), sugerindo que, que uma maior atividade respiratória está associada a uma menor eficiência metabólica, o que pode ser reflexo de um ambiente com MO de qualidade menos estável, resultando em maior liberação de CO₂ para a atmosfera.

A figura 25 apresenta a correlação de Pearson para os atributos biológicos no uso da pastagem que tiveram correlação acima de 0,65.

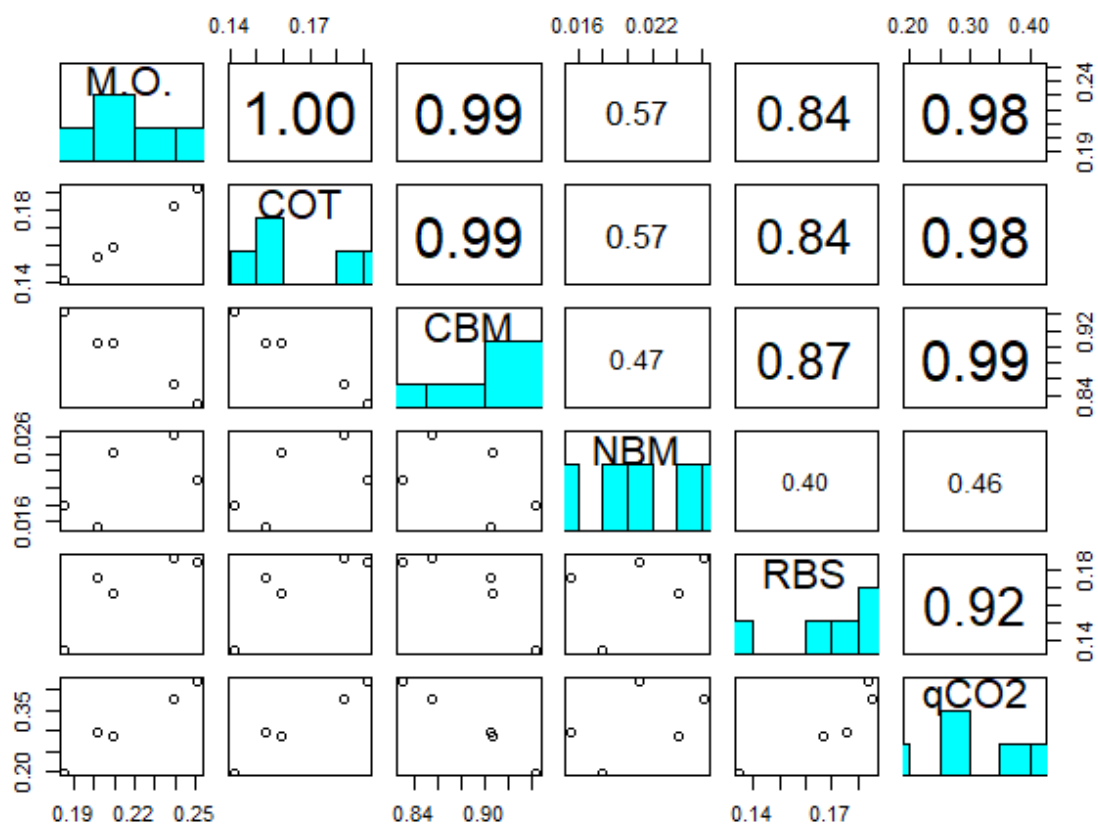


Figura 25. Correlação de Pearson dos atributos biológicos do solo para a pastagem. Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. CBM: carbono da biomassa microbiana. NBM: nitrogênio da biomassa microbiana. RBS: respiração basal do solo. qCO₂: quociente metabólico.

De acordo com a figura 25, a MO e o COT possuem correlação positiva no uso da pastagem com o CBM (0,99), RBS (0,84) e qCO₂ (0,98), indicando que a MO é uma fonte de C mais significativa na pastagem do que de C e N, conforme observado na floresta (figura 22), o que irá consequentemente influenciar na RBS, e em relação ao qCO₂, a relação sugere que os microrganismos utilizam a MO e o COT de forma menos eficiente, e que podem estar em um ambiente de estresse.

O CBM possui correlação positiva no uso da pastagem com a RBS (0,87) e qCO₂ (0,99), refletindo que os microrganismos estão ativos, mas não em condições ideais, o que exige uma decomposição rápida da MO e um maior gasto de energia.

A RBS possui correlação positiva no uso da pastagem com o qCO₂ (0,92), sugerindo que a maior atividade microbiana está associada a uma menor eficiência de uso do COT, indicando que os microrganismos podem estar sob estresse.

A figura 26 apresenta a correlação de Pearson para os atributos biológicos no uso da lavoura que tiveram correlação acima de 0,65.

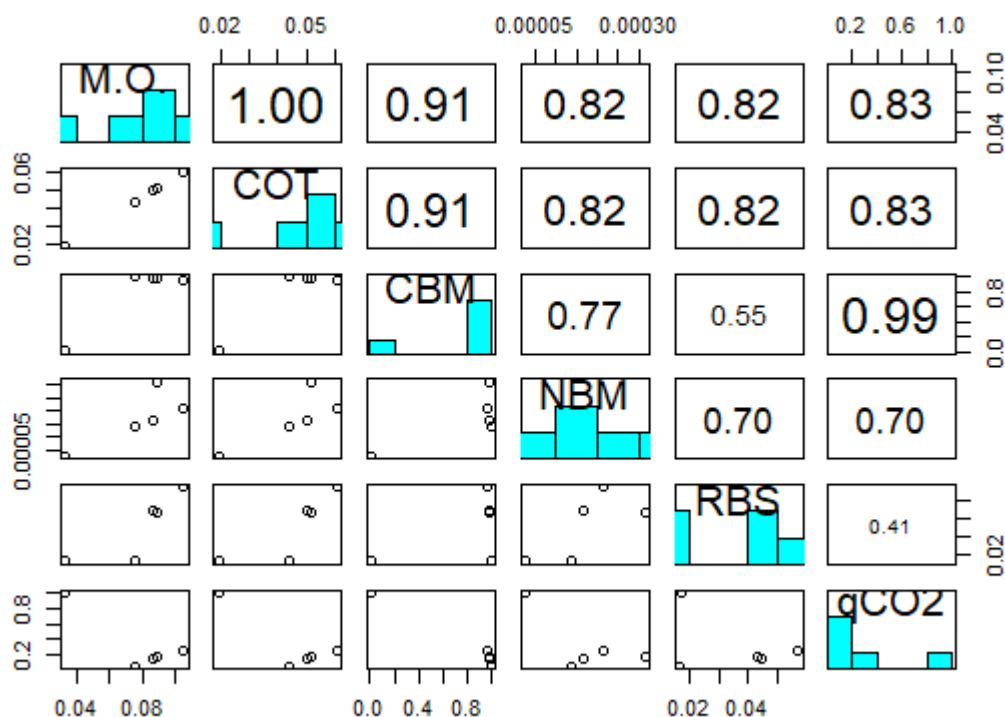


Figura 26. Correlação de Pearson dos atributos biológicos do solo para a lavoura. Sendo: M.O: matéria orgânica. COT: carbono orgânico total. CBM: carbono da biomassa microbiana. NBM: nitrogênio da biomassa microbiana. RBS: respiração basal do solo. qCO₂: quociente metabólico.

De acordo com a figura 26, a MO e o COT possuem correlação positiva no uso da lavoura com o CBM (0,91), NBM (0,82), RBS (0,82) e qCO₂ (0,83), indicando que o aumento do COT aumenta os atributos biológicos citados, inclusive o qCO₂, que indica baixa eficiência dos microrganismos e estresse ambiental.

O CBM possui correlação positiva no uso da lavoura com o NBM (0,77) e qCO₂ (0,99), refletindo uma boa relação entre C e N na MO do solo, e que apesar da atividade microbiana estar ativa, ela não está em condições ideais do solo, indicando baixa eficiência metabólica dos microrganismos.

O NBM possui correlação positiva no uso da lavoura com a RBS (0,70) e qCO₂ (0,70), o que pode ser explicado pela adubação química nitrogenada usada na lavoura, pois o aumento do NBM reflete no aumento da RBS, e reflete estresse ambiental nesse uso através da eficiência metabólica.

Analisando as figuras 24, 25 e 26, observa-se que a floresta possui correlação positiva entre a MO e COT com o CBM e NBM. A pastagem possui correlação positiva entre a MO e COT com o CBM, RBS e qCO_2 . A lavoura possui correlação positiva entre a MO e COT com o CBM, NBM, RBS e qCO_2 .

Apenas a pastagem não apresentou correlação entre a MO e COT com o NBM, o que pode ser justificado pela ausência de adubação química nitrogenada e baixa fertilidade natural do solo.

A atividade microbiana do solo é reconhecida como um indicador da qualidade do solo, pois os microrganismos desempenham um papel fundamental nos processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica (Silva et al., 2020). O metabolismo microbiano do solo responde de forma significativa às condições impostas pelos diferentes usos e manejo do solo (Bini et al., 2014).

Analisando as correlações entre a MO e COT e os usos do solo, nota-se que o CBM apresenta correlação com todos os usos, o que é justificado pois a MO é fonte principal de carbono no solo. O NBM apresentou correlação entre o COT e a floresta e lavoura, o que pode ser justificado pelo maior teor de MO no uso da floresta, e pela adubação nitrogenada no uso da lavoura.

A RBS e qCO_2 apresentaram correlação entre a MO e COT na pastagem e lavoura. Apesar de apresentar maiores valores de RBS, a floresta não apresentou correlação entre a MO, COT e RBS, o que pode representar que parte da MO do solo não está disponível aos microrganismos, refletindo um possível desequilíbrio biológico e que esse solo pode estar sendo impactado pela presença de animais, pois a área de pastagem não é cercada, e possivelmente o gado invade a área de floresta. A ausência de correlação entre a MO, COT e qCO_2 na floresta é esperada, pois apesar do uso da floresta poder estar em desequilíbrio, ele não está sob estresse ambiental, devido ao processo dinâmico nos usos da floresta que tornam esse ambiente com uma maior capacidade de resiliência.

A correlação entre a MO, COT e RBS na pastagem e lavoura é esperada, pois, quanto maior o valor de MO disponível aos microrganismos, maior será a taxa de decomposição, e conseqüentemente, maior a quantidade de dióxido de carbono liberada pelos microrganismos.

A correlação entre a MO, COT e qCO_2 indica que os solos da pastagem e lavoura estão em estresse ambiental, e mesmo os valores não diferindo estatisticamente entre os usos, a floresta não apresentou correlação, refletindo que

esse solo o aumento da MO e o COT não aumenta a eficiência metabólica, o que pode indicar que a MO na floresta é de maior qualidade que a da pastagem e lavoura, o que é esperado pois esses solos possuem uma maior perturbação e apresentam sinais de degradação.

7.6 CONCLUSÕES

O uso do solo apresentou impacto nos atributos biológicos do solo. A lavoura apresentou o menor valor de nitrogênio da biomassa microbiana e a lavoura e pastagem apresentaram menores taxas de respiração basal do solo, indicando que o uso do solo com lavoura teve um efeito negativo na atividade microbiana do solo. A floresta não apresentou diferenças estatisticamente significativas no carbono da biomassa microbiana e quociente metabólico entre a lavoura e pastagem, e nitrogênio da biomassa microbiana entre a pastagem, isso mostra que a área de floresta pode não ser um ambiente totalmente estável e protegido. A respiração basal do solo e o quociente metabólico tiveram correlação com o carbono orgânico total nos usos de pastagem e lavoura. No entanto, a floresta teve maior taxa de respiração basal do solo.

7.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711 – 728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e Atividade Microbiana de Solo Sob Vegetação Nativa e Diferentes Sistemas de Manejos. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.33, n.2, p.341-347, 2011. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.4841>

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, v.171, p.S106-S111, 1980.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, A. K. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v.25, n.3, p.393-395, 1993. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)

ANDERSON, T. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.1, n.2, p.285-293, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4)

BINI, D.; SANTOS, C. A.; BERNAL, L. P. T.; ANDRADE, G.; NOGUEIRA, M. A. Identifying indicators of C and N cycling in a clayey Ultisol under different tillage and uses in winter. *Applied Soil Ecology*, v.76, p.95–101, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.12.015>

BONGIORNO, G.; POSTMA, J.; BÜNEMANN, E.K.; BRUSSAARD, L.; DE GOEDE, R.G.M.; MÄDER, P.; TAMM, L.; THUERIG B. Soil suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, v.133, p.174-187, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.012>

CRECCHIO, C.; GELSOMINO, A.; AMBROSOLI, R.; MINATI, J.; RUGGIERO, P. Functional and molecular responses of soil microbial communities under differing soil management practices. *Soil Biology & Biochemistry*, v.36, p.1873-1883, 2004. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2004.05.008>

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A.; LEANDRO, W. M. Sistema de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.603-611, 2011. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200029>

CHÁVEZ, L.F.; ESCOBAR, L. F.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; MEURER, E. J. Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. *Pesquisa agropecuária Brasileira*, Brasília, v.46, n.10, p.1254-1261, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000020>

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; CARNEIRO, M. A. C. Atributos Biológicos Indicadores da Qualidade do Solo em Sistemas de Manejo na Região do Cerrado no Sul do Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.913-923, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400008>

DEMETER, I. Chemical and microbiological properties of Hungarian sandy soils under different management practices. *Applied Ecology and Environmental Research*, v.16, p.3473-3488, 2018. https://doi.org/10.15666/AEER/1603_34733488

EMADI, M.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; CHERATI, A.; DANESH, M.; MOSAVI, A.; SCHOLTEN, T. Predicting and mapping of soil organic carbon using machine learning algorithms in Northern Iran. *Remote Sensing*, v.12, n.14, p.2234, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12142234>

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (org.). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Brasília, DF: Embrapa, 3. ed., p.577, 2017.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono Orgânico (Cáp. 1). In: *Manual de métodos de análise de solo*. Brasil, Embrapa-RJ, p.360–367, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Divisão Territorial Brasileira – DTB*, 2020.

INSAM, H.; HASELWANDTER, K. Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. *Oecologia*, v.79, n.2, p.174-178, 1989. <https://doi.org/10.1007/BF00388474>

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems and Environment*, v.79, p.9-16, 2000. [http://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](http://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0)

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.79, n.1, p.9-16, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0)

ISLAM, M.; SIDDIQUE, K. H.; PADHYE, L. P.; PANG, J.; SOLAIMAN, Z. M.; HOU, D.; BOLAN, N. A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves. *Advances in Agronomy*, v.185, p.153-249, 2024. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>

JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, v.8, n.3, p.209-213, 1976. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5)

JOLIVET, C.; ARROUAYS, D.; LÉVÊQUE, J.; ANDREUX, F.; CHENU, C. Organic carbon dynamics in soil particle-size separates of sandy Spodosols when forest is cleared for maize cropping. *European Journal of Soil Science*, v.54, n.2, p.257-268, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00541.x>

MARQUES, K. R.; FIDELIS, R. R.; CAVAZZINI, P. H.; DE OLIVEIRA, L. B.; DA SILVA, R. R.; BURIN, L. X. Phosphate fertilization and bioactivator influences on fractions of organic matter and soil microbial biomass. *Research, Society and Development*, v.11, n.9, p.e52211932086-e52211932086, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32086>

NASCIMENTO, D. M.; CAVALIERI POLIZEIJ, K. M. V.; SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil and Tillage Research*, v.186, n.1, p.292-299, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.016>

PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. Biological indicators of soil health. CAB International, 1997.

PARKER, P. A.; SANSÓ, B. A heterogeneous spatial model for soil carbon mapping of the contiguous United States using VNIR spectra. Cornell University, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.12020>

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. D. F.; ZEMPULSKI, H. D. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR. (Circular, 76), p.38, 1992.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <<http://www.R-project.org>> Acesso em out. 2024.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; ZARIN, D. J.; OLIVEIRA, F. A.; VASCONCELOS, S. S.; CARVALHO, C. J. R.; SANTOS, M. M. L. S. Effect of water availability on soil microbial biomass in secondary forest in eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, n.2, p.377-384, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140135>

RAWLS, W.; PACHEPSKY, Y.; RITCHIE, J.; SOBECKI, T.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, v.116, p.61-76, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; GOMES, J. H. G.; FONTES, M. A.; SILVA, E. M. R. Enzyme activity, glomalin, and soil organic carbon in agroforestry systems. *Floresta e Ambiente*, v.27, p.e20170716, 2020. <http://doi.org/10.1590/2179-8087.071617>

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). Comunicado Técnico 99. Embrapa, 2007.

SOUZA, A. S.; KATO, O. R.; DE SOUZA FREITAS, L.; GALVÃO, J. R. Estoque de carbono em frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de uso na Amazônia oriental. *Research, Society and Development*, v.12, n.4, p.e0212440330-e0212440330, 2023. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.40330>

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *Revista*

Brasileira de Ciência do Solo, v.34, p.79-88, 2010. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100008>

SRADNICK, A.; OLTMANN, M.; RAUPP, J.; JOERGENSEN, R. G. Microbial residue indices down the soil profile after long-term addition of farmyard manure and mineral fertiliser to a sandy soil. *Geoderma*, v.226, p.79-84, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.005>

VAN BRUGGEN, A. H. C.; SEMENOV, A. M. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Applied Soil Ecology*, v.15, n.1, p.13-24, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00068-8)

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. Na extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, v.19, p.703-707, 1987. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)

VASCONCELOS, J. M. Indicadores químicos e biológicos de Latossolo Amarelo submetido aos sistemas de preparo de área usando a queima e a trituração da vegetação no Nordeste Paraense. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2010.

WANG, L.; KAUR, M.; ZHANG, P.; LI, J.; XU, M. Effect of different agricultural farming practices on microbial biomass and enzyme activities of celery growing field soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v.18, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312862>

WANG, W.J. DALAL, R. C. SMITH, C. J. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biology and Biochemistry*, v.35, n.2, p.273-284, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00274-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00274-2)

WARDLE, D. A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, v.67, n.3, p.321-358, 1992.

ZHAO, W.; EFREMOVA, N. Soil organic carbon estimation from climate-related features with graph neural network. Cornell University, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.15979>

8 DISCUSSÃO GERAL

A textura é um componente fundamental das propriedades do solo, e os solos arenosos apresentam maior permeabilidade, boa drenagem e menor capacidade de retenção de água e nutrientes, e as características de não pegajoso, pouco áspero e um pouco plástico e maleável. (Santos et al. 2018).

Segundo Lal (2001), práticas de manejo inadequadas afetam a estrutura, agregação e atividade microbiana, sendo essencial a implementação de técnicas de conservação do solo, como plantio direto e coberturas vegetais. Nos resultados encontrados observados que a área de floresta apresenta melhores condições físicas e melhor relação entre macro e microporos, se caracterizando em um ambiente com aeração favorável. De acordo com Augusto et al. (2022) em solos arenosos, entre os agregados do solo, existe a predominância de macroporos, que estão ligados a aeração, desenvolvimento de raízes e capacidade de retenção de água.

A manutenção da estrutura do solo em solos arenosos é outro desafio devido à sua baixa coesão, pois a falta de partículas finas influencia para que os agregados do solo fiquem menos estáveis e mais propensos a se desintegrarem sob pressão mecânica, com o tráfego de máquinas agrícolas, o que pode levar à compactação superficial e à formação de crostas, dificultando a infiltração de água e a emergência de plântulas (Tisdall; Oades, 1982).

A compactação do solo é frequentemente observada em áreas de lavoura manejadas com cultivo intensivo, devido ao tráfego de máquinas agrícolas pesadas e à ausência de práticas de manejo sustentáveis, como a rotação de culturas (Reichert et al., 2003), o que justifica a lavoura apresentar a maior densidade do solo e relação desproporcional entre macro e microporos, pois na área apesar de ser adotado o plantio direto, utiliza-se a sucessão de cultura.

Em pastagens, o pisoteio dos animais também pode levar à compactação, especialmente em camadas mais profundas do solo (Hamza; Anderson, 2005), o que corrobora com os resultados encontrados, pois a pastagem apresentou a maior proporção de microporos em relação a porosidade total.

Solos sob cobertura florestal tendem a manter uma melhor estrutura, com alta macroporosidade e estabilidade de agregados devido ao aporte contínuo de matéria orgânica e à intensa atividade biológica (Six et al., 2000; Bronick; Lal, 2005), a floresta apresentou os melhores indicadores físicos, biológicos e maiores teores de matéria

orgânica, sugerindo agregados estáveis.

Solos submetidos à atividade agrícola frequentemente enfrentam condições desfavoráveis devido à quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos presentes (Perez et al., 2004), os quais desempenham um papel crucial na composição do solo. Os resultados indicam maiores teores de matéria orgânica na área de floresta, o que é consistente com o entendimento atual de que solos florestais tendem a apresentar maior acúmulo de resíduos vegetais e, conseqüentemente, maior teor de matéria orgânica, o que reforça a importância de práticas de conservação em áreas de floresta para manter a integridade do solo e promover um ciclo de nutrientes sustentável.

A floresta apresentou bons níveis de carbono orgânico, Silva et al. (2010) destaca que os resíduos orgânicos influenciam nos níveis de matéria orgânica no solo. A pastagem apresentou valores intermediários de matéria orgânica e carbono orgânico total, de acordo com Geraldine et al. (1995) devido à contribuição adicional de matéria orgânica proveniente das raízes, os solos sob pastagens exibem teores de carbono orgânico total equivalentes ou até superiores aos encontrados em florestas.

Segundo Silva et al. (2021a) a atividade microbiana é um indicador que pode ser utilizado para monitorar como o uso do solo impacta o ambiente. E de acordo com Parkin et al. (1996) a microbiota é afetada pelo manejo do solo, vegetação, textura e teor de matéria orgânica.

O pH dos solos analisados indica solos ácidos, o que influencia na disponibilidade de nutrientes e de acordo com Silva et al. (2021b) também afeta a população microbiana.

É importante determinar a biomassa microbiana do solo, pois ela pode indicar alterações nos teores de matéria orgânica antes que isso possa ser observado nos teores de carbono e nitrogênio do solo (Babur; Dindaroglu, 2020).

Silva et al. (2021b) relata a importância de determinar o nitrogênio da biomassa microbiana para compreender a atividade microbiana do solo, pois o nitrogênio é o segundo elemento mais abundante nos microrganismos. Os resultados encontrados destacam que o nitrogênio da biomassa microbiana foi maior na floresta e pastagem, demonstrando maior presença de microrganismos nesses usos, devido a vegetação e presença de raízes.

O quociente metabólico não apresentou diferenças significativas entre os usos do solo. Conforme Souza et al. (2006), à medida que a biomassa microbiana do solo se torna mais eficiente, reduz-se as perdas de CO₂ pela respiração, pois as frações

de carbono são incorporadas, e de acordo com Tótola et al. (2002) um baixo índice de quociente metabólico sugere um ambiente mais estável. Nos resultados encontrados, o carbono da biomassa microbiana e o quociente metabólico não tiveram diferenças estatísticas significativas entre os usos do solo, o que sugere que a matéria orgânica disponível pode ser de baixa qualidade.

A respiração basal do solo foi maior na floresta. Ebrahimi et al. (2019) acrescenta que a respiração basal do solo depende do uso do solo e de suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Bini et al. (2013) salienta que a substituição de vegetação nativa por sistemas agropecuários reduz a respiração basal do solo, em decorrência da redução das entradas de carbono do solo, o que justifica a lavoura e pastagem apresentarem menores valores.

A ausência de diferença significativa da respiração basal do solo entre a pastagem e lavoura, pode ser explicada por se tratar de uma pastagem com mais de 10 anos de uso consecutivo e pela baixa taxa de lotação de animais, esses resultados são corroborados por Luna et al. (2019), que em sua pesquisa relataram um aumento na respiração basal do solo em resposta à maior taxa de lotação de animais.

A implementação de sistemas de uso do solo menos impactantes possui o potencial de favorecer a manutenção de níveis mais elevados de atividade biológica (Babujia et al., 2010), o que corrobora com os resultados encontrados, que demonstraram o uso de lavoura como o uso que mais afetou a qualidade do solo.

Segundo Sánchez-Navarro et al. (2020) o sistema de rotação de culturas é significativamente mais eficaz em aumentar o teor de carbono orgânico no solo, o nitrogênio e as atividades enzimáticas do solo. Dessa forma, justifica-se a lavoura apresentar baixos índices de teor de carbono orgânico no solo, pois na lavoura são cultivadas em sucessão soja e milho ou aveia.

A classificação de um solo como de alta qualidade esteve por muito tempo relacionada apenas à sua fertilidade, e com as transformações em relação ao conceito de qualidade de solo, reconhecemos que um solo de alta qualidade também é caracterizado por uma boa estruturação e pela presença de uma diversidade abundante de organismos como indicadores (Geisen et al., 2019).

De acordo com Six et al. (2000), os macroagregados do solo produzem maiores taxas de emissão de CO₂ devido à sua menor estabilidade e menor proteção contra a mineralização da matéria orgânica, em comparação com os microagregados.

A saúde do solo está relacionada ao seu uso sustentável e de acordo com

Stellacci et al. (2021) o manejo adequado é uma ação importante para mitigar os impactos da sucessão de culturas e contribuir com a qualidade e saúde do solo. segundo Angon et al. (2023) substituir a sucessão de culturas pela rotação de culturas, plantio direto e incorporação de matéria orgânica no solo melhora a saúde do solo, e tem impactos positivos na produtividade.

Miranda et al. (2020) ressalta que o uso de sistemas de manejo voltados para a conservação é importante pois eles desempenham um papel fundamental na prevenção da degradação do solo. Lavallee et al. (2020) acrescenta que o carbono orgânico total desempenha um papel importante na sustentabilidade do ecossistema agrícola, pois possui a capacidade de suportar os serviços ecossistêmicos do solo em todo o mundo.

Inicialmente, a área estudada era em sua totalidade floresta nativa, por volta da década de 1970, iniciou o desmatamento para cultivo agrícola e posterior uso em parte por pastagem e lavoura, deixando apenas como floresta a área de preservação permanente, próximo ao rio Rio Branco. Analisando os resultados, nota-se que o manejo dos sistemas agropecuários impactou na agregação e na atividade microbiana do solo, tendo o uso com lavoura o seu impacto mais expressivo. Santos et al. (2019) destaca que o manejo intensivo da agricultura acarreta redução no carbono orgânico total, em torno de 24% a 52%, dependendo do manejo e uso do solo.

Manter e aumentar a matéria orgânica, e conseqüentemente, o carbono orgânico total é um processo lento e requer manejo adequado, principalmente em regiões tropicais onde a taxa de decomposição é maior devido as condições climáticas (Santini et al., 2019). Pereira et al. (2021) indica a aplicação de resíduos orgânicos para a contribuição da saúde do solo.

Sanderman et al. (2017) estima que a mudança no uso do solo transferiu 133 milhões de toneladas de carbono dos solos brasileiros para a atmosfera, ficando o Brasil entre os 10 maiores emissores de CO₂ do solo mundialmente. A contribuição do Brasil nas emissões de CO₂ é em decorrência do desmatamento e do uso do solo.

A quantidade de carbono orgânico acumulada no solo está diretamente relacionada à taxa de deposição de resíduos vegetais e à velocidade com que esses resíduos se decompõem (Santos et al., 2019). Nas florestas, o carbono orgânico total é armazenado como biomassa viva (Pan et al., 2011) e pequenas diminuições nos estoques de carbono orgânico podem aumentar as emissões de CO₂ do solo para a atmosfera (Lal, 2005).

Os impactos resultantes do uso inadequado do solo e das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂, têm sido amplamente investigados, com o objetivo de identificar causas diretas e as consequências que influenciam as mudanças climáticas globais (Alves et al., 2018). As trocas de CO₂ entre o solo e a atmosfera, ou seja, o sequestro de carbono durante a fotossíntese e as emissões de CO₂ resultantes da respiração do solo, apresentam relação com o uso do solo (Oliveira et al., 2023).

Analisando os resultados encontrados, o uso com lavoura apresenta menor valor de carbono orgânico total, indicando perda de carbono para a atmosfera, em função da sua agregação e atividade microbiana, do que em relação aos usos com pastagem e floresta. Dessa forma, conclui-se que os solos de floresta e pastagem conseguem manter os teores de carbono orgânico total de forma mais eficaz que a lavoura, o que se justifica, pois, as áreas com maiores teores de carbono orgânico total apresentam maiores potencialidades de sequestro de carbono atmosférico.

A lavoura apresentou variáveis linearmente correlacionadas ao quociente metabólico. A respiração basal e o quociente metabólico apresentaram correlação entre o carbono orgânico total no uso de pastagem e lavoura. Essas correlações, sugerem que a floresta pode estar passando por um desequilíbrio biológico, acentuado pela ausência de cerca entre ela e a pastagem, o que permite a presença de animais, bem como, indica que a pastagem e a lavoura se caracterizam como um ambiente de estresse ambiental, apesar dos valores de quociente metabólico não terem tido diferenças significativas entre os usos do solo.

Apesar da floresta ter apresentado maiores valores de carbono orgânico total e de respiração basal do solo, as correlações indicam que a área de floresta não é um ambiente totalmente estável e protegido, e que pode estar em desequilíbrio biológico.

Paustian et al. (2019) destaca que para o sequestro de carbono orgânico no solo deve-se considerar o aumento das entradas de carbono e a redução das taxas de decomposição, juntamente com o manejo empregado. A FAO (2022) acrescenta que as práticas agrícolas que levam ao aumento de carbono no solo, precisam ser mantidas e fomentadas.

Avillez; Carvalho (2015) reforçam a ideia de aumentar o teor de matéria orgânica do solo e promover o sequestro de carbono no solo, através de práticas agropecuárias sustentáveis.

Portanto, a qualidade do solo e o sequestro de carbono orgânico estão

relacionados ao uso do solo, e a relação entre carbono orgânico total depende da agregação e atividade microbiana do solo.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi avaliada a influência do uso do solo e sua relação com o carbono orgânico total nos atributos físicos, químicos e biológicos de um solo arenoso

No capítulo 1 relacionou-se o carbono orgânico total e a agregação do solo. Os resultados revelaram que o manejo afetou a qualidade física do solo e o seu uso afetou a agregação do solo. As áreas sob cobertura florestal mantiveram uma estrutura do solo superior, com alta porosidade total e índice de estabilidade de agregados, em comparação com áreas de lavoura e pastagem. O uso da lavoura resultou em compactação, aumento da densidade do solo e redução da porosidade total, e o uso da pastagem afetou menos as características físicas do que a lavoura.

Nesse artigo, observou-se que os níveis de carbono orgânico total diminuíram significativamente na lavoura, enquanto as pastagens conseguiram manter os níveis. O índice de estabilidade de agregados não apresentou diferenças estatísticas na profundidade de 0-10 cm entre os usos, e foi maior na floresta e pastagem na profundidade de 10-20 cm, indicando que a lavoura apresenta uma maior susceptibilidade à erosão e degradação do solo em profundidade.

A pastagem apresentou maior valor de porosidade total, indicando compactação, a estabilidade de agregados aumenta em profundidade, quando o solo é menos compactado, e os valores de argila dispersa em água e densidade do solo encontrados são intermediários. O carbono orgânico total apresentou correlação positiva com a agregação do solo no uso da floresta.

No capítulo 2 relacionou-se o carbono orgânico total e os atributos químicos do solo. Os resultados revelaram que a lavoura apresentou os menores teores de matéria orgânica e carbono orgânico total. O solo da floresta e pastagem possui melhores atributos químicos em comparação com a lavoura, sugerindo que o uso agrícola intensivo pode levar à degradação dos recursos do solo, como o carbono orgânico total e a capacidade de retenção de nutrientes, o que reforça a importância de práticas agrícolas sustentáveis para manter a qualidade química do solo, como a incorporação de matéria orgânica, correção da acidez e rotação de culturas, para promover a ciclagem de nutrientes.

Nesse artigo, observou-se que os teores de K e Al foram maiores na floresta, e os teores de Ca+Mg, CTC, SB e V% foram maiores na floresta e pastagem. Os atributos químicos pH, Ca+Mg, Ca, SB e V% apresentaram correlação positiva com a

matéria orgânica e o carbono orgânico total na floresta. Os atributos químicos SB e V% apresentaram correlação positiva com a matéria orgânica e o carbono orgânico total na pastagem. Os atributos químicos pH, P, K e V% apresentaram correlação positiva com a matéria orgânica e o carbono orgânico total na lavoura.

A matéria orgânica e o carbono orgânico total possuem correlação positiva com o V% nos três usos do solo analisados, com o pH na floresta e pastagem, com a SB na floresta e pastagem, e com o P e K na lavoura, o que ocorre devido a adubação química. Ainda na floresta, se correlacionam com o Ca e Ca+Mg.

No capítulo 3 relacionou-se o carbono orgânico total e a atividade microbiana do solo. Os resultados revelaram que a floresta pode estar sendo um ambiente com fragilidades biológicas, em decorrência das perturbações antrópicas, devido a entrada de animais e supressão vegetal, pela falta de cercamento da área.

Nesse artigo, observou-se que o carbono da biomassa microbiana e o quociente metabólico não apresentaram diferenças significativas estatisticamente entre os usos do solo, o nitrogênio da biomassa microbiana foi maior na floresta e pastagem e a respiração basal do solo foi maior na floresta, indicando que o uso do solo com lavoura teve um efeito negativo na atividade microbiana do solo, apresentando estresse ambiental.

A lavoura apresentou os piores indicadores de matéria orgânica, carbono orgânico total e biológicos, enfatizando que práticas de cultivo intensivo afetam a qualidade do solo, influenciando na fertilidade natural, microbiota e ciclagem de nutrientes, o que foi enfatizado pela correlação positiva do carbono orgânico total com o quociente metabólico.

A pastagem apresentou uma atividade microbiana moderada, com o nitrogênio da biomassa microbiana não se diferenciando estatisticamente da floresta e com a respiração basal do solo não se diferenciando estatisticamente da lavoura, o que foi enfatizado pela correlação positiva do carbono orgânico total com o quociente metabólico e pela ausência de correlação com o nitrogênio da biomassa microbiana.

A floresta não apresentou altos indicadores biológicos, sendo que apenas a respiração basal do solo se diferenciou estatisticamente da pastagem e lavoura e o nitrogênio da biomassa microbiana se diferenciou estatisticamente da lavoura, indicando que a área de floresta não é um ambiente totalmente estável e protegido, o que foi enfatizado pela ausência de correlação do carbono orgânico total com a respiração basal do solo.

Analisando os três artigos, observa-se que os maiores teores de carbono orgânico total foram encontrados na floresta, seguido pela pastagem, indicando que a pastagem apresenta maior resiliência para manter a qualidade do solo em comparação a lavoura, conseguindo manter seus níveis de carbono orgânico total em profundidade. A lavoura é o uso que mais afetou os atributos físicos, químicos e biológicos, impactando a agregação, atributos químicos e atividade microbiana do solo.

Apesar dos valores dos atributos físicos, químicos e biológicos terem sido relativamente maiores no uso da floresta, destaca-se que o solo nesse uso não apresenta condições ideais, principalmente nos atributos biológicos, refletindo sinais de estresse ambiental para os microrganismos.

Por fim, os resultados validam a hipótese de que o uso do solo leva a alterações na relação entre o carbono orgânico total e os atributos físicos, químicos e biológicos.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. R.; MEDEIROS, A. N.; ANDRADE, A. P.; FRIGHETTO, R. T. S.; SILVA, M. J. S. A caatinga e a oportunidade de mitigação das emissões de gases de efeito estufa pela atividade pastoril. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v.11, n.2, p.639-661, 2018. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n2p639-661>
- ANGON, P. B.; ANJUM, N.; AKTER, M.; KC, S.; SUMA, R. P.; JANNAT, S. An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. *Advances in Agriculture*, n.1, p.8861216, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8861216>
- AUGUSTO, M. V. S.; DEMETRIO, G. B.; LAJUS, C. R.; AZEVEDO-RIBEIRO, P. F.; DOS REIS DUARTE, E.; SAUER, A. V. Preservação de recursos naturais através de práticas de manejo e seus impactos na qualidade física do solo. *Uniciências*, v.26, n.2, p.108-119, 2022. <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2022v26n2p108-119>
- AVILLEZ, F.; CARVALHO, M. A importância de uma gestão sustentável do solo para o crescimento da agricultura portuguesa. *Cultivar Cadernos de Análise e Prospetiva*, n.2, p.27-40, 2015.
- BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, v.42, p.2174-2181, 2010. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.013>
- BABUR, E.; DINDAROGLU, T. Seasonal changes of soil organic carbon and microbial biomass carbon in different forest ecosystems. *Environmental factors affecting human health*, v.1, p.1-21, 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90656>
- BINI, D.; SANTOS, C. A.; CARMO, K. B.; KISHINO, N.; ANDRADE, G.; ZANGARO, W.; NOGUEIRA, M. A. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. *European Journal of Soil Biology*, v.55, p.117–123, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.12.010>
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v.124, n.1-2, p.3-22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- EBRAHIMI, M.; SARIKHANI, M. R.; SINEGANI, A. A. S.; AHMADI, A.; KEESSTRA, S. Estimating the soil respiration under different land uses using artificial neural network and linear regression models. *Catena*, v.174, p.371-382, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.035>
- FAO. Global soil organic carbon sequestration potential map – SOCseq V.1.1. Technical Report. Rome, 2022. <https://doi.org/10.4060/cb9002en>
- GEISEN, S.; BRIONES, M. J.; GAN, H.; BEHAN-PELLETIER, V. M.; FRIMAN, V. P.; DE GROOT, G. A.; WALL, D. H. A methodological framework to embrace soil biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry*, Londres, v.136, p.107536, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107536>
- GERALDES, A. P. A.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Biomassa microbiana de solo sob

pastagens na Amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.19, p.55-60, 1995.

HAMZA, M.; ANDERSON, W. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, v.82, p.121-145, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management*, v.220, n.1-3, p.242-258, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>

LAL, R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, v.71, p.141–191, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)71014-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)71014-0)

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. *Global Change Biology*, v.26, p.261-273, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>

LUNA, R. G.; LUNA, J. G.; ANDRADE, A. P.; SOUTO, J. S.; GORLACH-LIRA, K. Biomassa e atividade microbianas em áreas de caatinga sob diferentes densidades de caprinos. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v.12, p.217-250, 2019. <http://doi.org/10.21438/rbgas.061218>

MIRANDA, P. H. C.; MARQUES, J. D.; REIS, E. G.; DOS SANTOS, G. A. M.; DA SILVA JÚNIOR, M. L.; DE MELO, V. S. Atributos biológicos em diferentes sistemas de manejo do solo no município de Paragominas, Pará. *Brazilian Journal of Development*, v.6, n.9, p.72858-72870, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-655>

OLIVEIRA, C. L.; SOUSA LIMA, J. R.; SOUZA, R. M. S.; DANTAS, A. C.; SOUZA, E. S.; FERREIRA, R. C. A Caatinga Emite ou Sequestra Carbono?. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.16, n.02, p.791-804, 2023.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; HAYES, D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, v.333, n.6045, p.988-993, 2011. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>

PARKIN, T. B.; DORAN, J. W.; FRANCO-VIZCAINO, E. Field and laboratory tests of soil respiration. In: Doran, J. W.; Jones, A. (Eds) – *Method for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America, p.231-245, 1996.

PAUSTIAN, K.; LARSON, E.; KENT, J.; MARX, E.; SWAN, A. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Frontiers in Climate*, v.1, p.482133, 2019. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BATISTA, I.; MELO, T. R. D.; SILVA, E. C. D.; PINTO, L. A. D. S. R. Biogenic and physcogenic aggregates: formation pathways, assessment techniques, and influence on soil properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.45, p.01-23, 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210108>

PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; MCMANUS, C. Carbono da Biomassa Microbiana em Solo Cultivado com Soja Sob Diferentes Sistemas de Manejo nos Cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.6, p.567-573, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000600008>

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*, v.27, p.29-48, 2003.

SÁNCHEZ-NAVARRO, V.; ZORNOZA, R.; FAZ, A.; FERNANDEZ, J. A. Comparison of soil organic carbon pools, microbial activity and crop yield and quality in two vegetable multiple cropping systems under Mediterranean conditions. *Scientia Horticulturae*, v.261, p.109025, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109025>

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.114, n.36, p.9575-9580, 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>

SANTINI, N. S.; ADAME, M. F.; NOLAN, R. H.; MIQUELAJAUREGUI, Y.; PIÑERO, D.; MASTRETTA-YANES, A.; EAMUS, D. Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests. *Forest Ecology and Management*, v.446, p.115-125, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.029>

SANTOS, C. A.; REZENDE, C. D. P.; PINHEIRO, É. F. M.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. *Geoderma*, v.337, p.394-401, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.045>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COLEHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIEVIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília: Embrapa Solos. Cap. 19, p.294-295, 2018.

SILVA, C. F. D.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES, L. A. D. S.; TEODORO, S. A.; FONTES, M. A.; GAIA-GOMES, J. H.; SILVA, E. M. R. D. Soil attributes as indicators of the stabilization process of erosion in gullies at different formation stages in the southeast region of Brazil. *Revista Ambiente & Água*, v.16, n.4, p.e2632, 2021a. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2632>

SILVA, H. S.; DA SILVA CHAVES, J.; DO NASCIMENTO, J. P. S.; DE MATOS, S. M.; DE BRITO NETO, A. F.; LEITE, J. L.; DE BRITO, W. A. Atividade microbiana no solo em sistema de produção consorciado. *Research, Society and Development*, v.10, n.14, p.e534101422366-e534101422366, 2021b. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22366>

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e Atividade Microbiana em Solo Sob Diferentes Sistemas de Manejo na Região Fisiográfica Campos das Vertentes – MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1585-1592, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500011>

SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, n.2, p.681-689, 2000. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C.; BUZETTI, S.

Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob Cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.28, p.323-329, 2006.

STELLACCI, A. M.; CASTELLINI, M.; DIACONO, M.; ROSSI, R.; GATTULLO, C. E. Assessment of soil quality under different soil management strategies: combined use of statistical approaches to select the most informative soil physico-chemical indicators. *Applied Sciences*, v.11, n.11, p.5099, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11115099>

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v.33, n.2, p.141-163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. In: VENEGAS, V. H. A.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.195-276, 2002.