



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

JOÃO CARLOS GONÇALVES

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO SUBMETIDO À DIFERENTES  
USOS**

---

Londrina  
2024

JOÃO CARLOS GONÇALVES

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO SUBMETIDO À DIFERENTES  
USOS**

Tese apresentada ao Departamento de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Professor Doutor João Tavares Filho

Coorientadora: Professora Doutora Gabriela Machineski da Silva.

Londrina  
2024

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

G635a Gonçalves, João Carlos.  
ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SUBMETIDO À DIFERENTES USOS / João Carlos Gonçalves. - Londrina, 2024.  
121 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, 2024.  
Inclui bibliografia.

1. Qualidade do Solo - Tese. 2. Indicadores de Qualidade - Tese. 3. Usos do Solo - 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

JOÃO CARLOS GONÇALVES

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO SUBMETIDO À DIFERENTES  
USOS**

Tese apresentada ao Departamento de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gabriela Machineski da Silva  
Coorientadora  
Presidente da Banca  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Francieli de Fátima Missio  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Marco Segalla Prazeres  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alini Taichi da Silva Machado  
Instituto de Desenvolvimento Rural  
IDR-PR

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Campos de Almeida  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 06 de dezembro de 2024.

## DEDICATÓRIA

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

Aos meus amados pais, João e Ana, pelo amor e apoio que sempre dedicaram a mim.

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

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Tavares Filho e minha coorientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Gabriela Machineski da Silva, pelos ensinamentos, compreensão e dedicação.

## AGRADECIMENTOS

A realização desta 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.

À Deus, por tudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Tavares Filho, pela sua orientação e apoio ao longo de todo o processo. Sua dedicação, paciência e insights valiosos foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese .

À minha coorientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dra. Gabriela Machineski da Silva, por sua atenção, dedicação e prestatividade, sempre presente para ajudar, orientar e durante o processo de realização das análises laboratoriais e escrita desta tese.

À minha amiga Emanuelle Nunes, que iniciou este sonho junto comigo no ano de 2021, e juntos trilhamos este caminho com muita dedicação, determinação e acima de tudo, uma grande amizade!

Sou grato aos colegas e técnicos do laboratório, excepcionalmente à Stephanie Locatelli, que ajudou muito nas práticas laboratoriais, 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 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 desta tese.

Gostaria de agradecer também 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.

Por fim, é com muita satisfação que deixo aqui meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que compartilharam comigo desta tese, e ajudaram a torná-lo possível.

Muito Obrigado!

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3:1

GONÇALVES, João Carlos. **ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SUBMETIDO À DIFERENTES USOS.** 2024. 121f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2024.

## RESUMO

Os ambientes de produção agrícola são oriundos da transformação dos ambientes naturais. Os diferentes manejos exercem grande influência nas propriedades desses solos argilosos, e, quanto maior a intensidade do uso, maior é a degradação. A qualidade do solo pode ser avaliada através dos indicadores físicos, químicos e biológicos, e da inter-relação existente entre eles. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade físico-química e biológica de um solo argiloso, submetido diferentes usos: culturas anuais em plantio direto, culturas anuais com consórcio de *Uruchloa ruziziensis*, pastagem e área de floresta. O local de estudo foi o município de São João do Ivaí-PR. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) nas quatro áreas estudadas e com cinco repetições cada, as médias foram comparadas pelo teste ANOVA e Tukey (5%), PCA e correlação de Pearson entre as variáveis testadas. Foram coletadas amostras em duas profundidades, 0-10 e 10-20 cm. Foram avaliadas os atributos químicos pH, P, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, H+Al, CTC, SB, V%, matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT), os atributos biológicos, carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>), quociente microbiano (qMic), e a respiração basal do solo (RBS), e os atributos físicos avaliados foram argila dispersa em água (ADA), índice de floculação (IF), índice de dispersão (ID) macroporosidade, microporosidade, porosidade total (Pt), densidade do solo (Ds), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados do solo (IEA). A área de floresta apresentou maior CTC, pH, V% e P, e foi também o uso do solo que se destacou com os maiores índices em todos os atributos microbiológicos estudados, com exceção do qCO<sub>2</sub> que foi maior na área de lavoura, sinalizando estresse da microbiota do solo devido ao manejo mais intenso. A área de lavoura se destacou com o maior valor de ADA, ID e menor IF. Os valores de pH e Ca se correlacionaram com a ADA e ID, e a floculação aumentou à medida que os valores de Ca diminuíram. Houve correlação positiva entre os indicadores físicos e biológicos, nas áreas onde o CBM e NBM foram maiores (área de floresta), o solo apresentou melhor distribuição entre macro e microporos, menor valor de ADA e menor densidade. Em geral, o uso do solo influencia a sua qualidade, e a intensidade do uso pode aumentar a degradação que está relacionada à diminuição da quantidade de carbono orgânico. Desta forma, fica evidente a importância de incorporar nos sistemas agrícolas produtivos e práticas conservacionistas que incrementem a matéria orgânica no solo, para uma melhoria na atividade microbiológica, como também nos atributos químicos e físicos oferecendo uma agricultura mais produtiva e sustentável.

**Palavras-chave:** Manejo do solo. Qualidade do solo. Indicadores de Qualidade. Matéria orgânica. Uso do solo.

GONÇALVES, João Carlos. **PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL ATTRIBUTES OF A CLAY LAYER SUBJECTED TO DIFFERENT USES.** 2024. 121p. Thesis (Ph.D. degree in Agronomy) – State University of Londrina, Londrina, 2024.

## ABSTRACT

Agricultural production environments arise from the transformation of natural environments. Different management practices have a great influence on the properties of these clay soils, and the greater the intensity of use, the greater the degradation. Soil quality can be assessed through physical, chemical and biological indicators, and the interrelationship between them. The objective of this study was to evaluate the physical-chemical and biological quality of a clay soil, subjected to different uses: annual crops in no-tillage, annual crops with intercropping of *Uruchloa ruziziensis*, pasture and forest area. The study site was the municipality of São João do Ivaí-PR. The experimental design used was completely randomized (DIC) in the four studied areas and with five replicates each, the means were compared by ANOVA and Tukey test (5%), PCA and Pearson correlation between the variables tested. Samples were collected at two depths, 0-10 and 10-20 cm. The chemical attributes pH, P, K<sup>+</sup>, Al<sup>+3</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, H+Al, CTC, SB, V%, organic matter (OM), total organic carbon (TOC), biological attributes, microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), metabolic quotient (qCO<sub>2</sub>), microbial quotient (qMic), and soil basal respiration (SBI) were evaluated, and the physical attributes evaluated were water-dispersed clay (WCD), flocculation index (FI), dispersion index (DI), macroporosity, microporosity, total porosity (Pt), soil density (Ds), weighted mean diameter (WMD), geometric mean diameter (GMD), and soil aggregate stability index (SSI). The forest area presented the highest CEC, pH, V% and P, and it was also the land use that stood out with the highest indices in all microbiological attributes studied, with the exception of qCO<sub>2</sub>, which was higher in the crop area, signaling stress of the soil microbiota due to more intense management. The crop area stood out with the highest ADA, ID and lowest IF values. The pH and Ca values correlated with ADA and ID, and flocculation increased as Ca values decreased. There was a positive correlation between the physical and biological indicators; in the areas where the CBM and NBM were higher (forest area), the soil presented better distribution between macro and micropores, lower ADA value and lower density. In general, soil use influences its quality, and the intensity of use can increase degradation, which is related to the decrease in the amount of organic carbon. Thus, it is clear how important it is to incorporate conservation practices into productive agricultural systems that increase organic matter in the soil, to improve microbiological activity, as well as chemical and physical attributes, offering more productive and sustainable agriculture.

**Key words:** Soil management. Soil quality. Quality Indicators. Organic matter. Land use.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de São João do Ivaí em relação ao Estado do Paraná (a), em relação ao Brasil (b) e relação a América do Sul (c). Fonte: conteúdo aberto em WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. ....	18
Figura 2. Distribuição dos pontos de coleta de amostras de solo em cada uma das áreas estudadas. Fonte: Google Earth.....	21
Figura 3. Distribuição de macro e microporos na profundidade de 0-10 cm para os usos e manejos do solo estudados. ....	72
Figura 4. Distribuição de macro e microporos na profundidade de 10-20 cm para os usos e manejos do solo estudados. ....	72
Figura 5. Análise de PCA (Análise de componentes principais) para os atributos físicos do solo e os tipos de usos nas duas profundidades.....	77
Figura 6. Análise da PCA (Análise de componentes principais) para os atributos químicos do solo e os tipos de usos nas duas profundidades. ....	84
Figura 7. Análise de PCA para os atributos biológicos do solo nos diferentes usos. ....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos tratamentos e respectivos usos do solo.....	21
Tabela 2. Teores de areia, silte e argila do solo nas quatro áreas de estudo e em duas profundidades.....	65
Tabela 3. Valores de ADA, IF e ID para os tratamentos estudados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. ....	68
Tabela 4. Valores de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo para os usos e manejos do solo estudados em duas profundidades. ....	70
Tabela 5. O Diâmetro Médio Ponderado (DMP), o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e o Índice de Estabilidade dos Agregados do Solo (IEA). ....	76
Tabela 6. Atributos químicos do solo avaliados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm nos usos e manejos estudados. ....	79
Tabela 7. Valores de Respiração Basal do Solo (RBS), Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM), Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), Quociente Metabólico (qCO <sub>2</sub> ) e Quociente Microbiano (qMic), para os diferentes usos do solo na profundidade de 0-10 cm. ....	86
Tabela 8. Correlação de Pearson e <i>p</i> -valor para os atributos químicos (pH, Ca, Al e MO) e físicos (ADA, IF e ID) do solo. ....	92
Tabela 9. Correlação de Pearson e <i>p</i> -valor para os atributos ADA, Índice de Dispersão (ID), Índice de Floculação (IF), Microporos, Macroporos, Porosidade Total (Pt) e Densidade do Solo (Ds). ....	93
Tabela 10. Correlação de Pearson e <i>p</i> -valor para Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) e Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM), com macroporosidade, microporosidade, Porosidade Total (Pt), Densidade do solo (Ds), Argila dispersa em Água (ADA), Índice de Floculação (IF) e Índice de Dispersão (ID). ....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
Al <sup>+3</sup>	Alumínio
C	Carbono
Ca <sup>+2</sup>	Cálcio
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de cálcio
CBM	Carbono da Biomassa Microbiana
Cm	Centímetros
Cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
CO	Carbono orgânico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COT	Carbono orgânico total
CTC	Capacidade de troca de catiônica
CV	Coefficiente de variação
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DMG	Diâmetro médio geométrico
DMP	Diâmetro médio ponderado
Ds	Densidade do solo
Fe	Ferro
g	Gramas
H	Hidrogênio
H+Al	Acidez potencial
IEA	Índice de estabilidade de agregados
K <sup>+</sup>	Potássio

KCl	Cloreto de potássio
Kg	Quilograma
M	Metros
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 <sub>2</sub>	Quociente metabólico
qMic	Quociente microbiano
RBS	Respiração Basal do solo
SB	Soma de bases
TFSA	Terra fina seca ao ar
V%	Saturação de bases

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. METODOLOGIA GERAL .....</b>	<b>18</b>
2.1 Caracterização da área de estudo.....	18
2.2 Delineamento experimental .....	20
2.3 Caracterização do solo .....	21
2.3.1 Determinação dos Atributos Químicos do Solo .....	21
2.3.2 Determinação da matéria orgânica e do carbono orgânico total.....	22
2.3.3 Determinação dos Atributos Físicos do Solo .....	23
2.3.4 Determinação dos Atributos Biológicos do Solo .....	26
2.3.5 Análises Estatísticas .....	29
<b>3. ARTIGO A - INDICADORES DE QUALIDADE E ESTRATÉGIAS DE MANEJO: UMA REVISÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES USOS NOS ATRIBUTOS DO SOLO. ....</b>	<b>30</b>
3.1 Resumo .....	30
3.2 Abstract .....	30
3.3 Introdução.....	31
3.4 Ocupação e uso dos agrícolas no Brasil .....	32
3.5 Fatores que influenciam a Ocupação e o Uso do Solo Agrícola.....	34
3.6 Sistemas de Manejo do Solo .....	35
3.7 Qualidade do solo.....	39
3.7.1 Indicadores de Qualidade Física do Solo .....	41
3.7.2 Indicadores de Qualidade Química do Solo.....	45
3.7.3 Indicadores de Qualidade Biológica do Solo .....	49
3.8 Qualidade vs. Manejo do Solo.....	53
3.9 Impactos do Manejo Inadequado na Qualidade do Solo .....	55
3.10 Estratégias de Manejo para Melhorar a Qualidade do Solo .....	57
3.10.1 Plantio Direto .....	57
3.10.2 Rotação de Culturas .....	58
3.10.3 Sistemas consorciados .....	58
3.11 Desafios e Perspectivas .....	59
3.12 Conclusão.....	60

<b>4. ARTIGO B - IMPACTOS DE DIFERENTES TIPOS DE USO E MANEJO NA QUALIDADE, física, química E BIOLÓGICA DE UM LATOSSOLO ARGILOSO .....</b>	<b>61</b>
4.1 Resumo .....	61
4.2 Abstract .....	62
4.3 Introdução.....	63
4.4 Materiais e métodos .....	64
4.4.1 Caraterização da área de estudo.....	64
4.4.2 Delineamento experimental e tratamentos .....	65
4.4.3 Determinação dos Atributos Físicos do Solo .....	66
4.4.4 Determinação dos atributos químicos do solo .....	67
4.4.5 Determinação dos Atributos Biológicos .....	67
4.4.6 Análises estatísticas .....	67
4.5 Resultados e Discussão .....	68
4.5.1 Atributos físicos do solo .....	68
4.5.2 Atributos químicos do solo .....	79
4.5.3 Atributos biológicos do solo .....	86
4.5.4 Correlações de Pearson entre os atributos do solo estudados.....	91
4.6 Conclusão.....	95
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>96</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>97</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os ambientes de produção agrícola são produtos da transformação dos ambientes naturais (ALMEIDA et al., 2016). Neste viés, o solo apresenta-se como um recurso essencial para que a produção agrícola se mantenha em patamares suficientes para suprir as necessidades alimentares da população mundial.

A relevância do solo para a vida no planeta é tamanha que, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), designou o dia 5 de dezembro como Dia Mundial do Solo, por considerar que esforços devem ser realizados continuamente para garantir que suas funções e oferta de serviços ecossistêmicos se mantenham para as gerações seguintes (LOPES et al., 2023), uma vez que, o solo é o compartimento que abriga mais de 25% da biodiversidade do planeta (ORGAZZI et al., 2016). Pensando assim, é fundamental preservar a qualidade do solo, assegurando que suas funções se mantenham de forma eficaz ao longo dos anos (KARLEN, et al., 1997).

O conceito de qualidade do solo surge no meio científico com mais intensidade a partir da década de 90, sendo que os estudos sobre a relação do solo com o funcionamento adequado dos demais recursos do meio e da biodiversidade, se intensificaram nesta época (DORAN E PARKIN, 1994; KARLEN et al., 2021). Desta forma, a qualidade do solo pode ser definida pela sua capacidade de desempenhar papéis ecológicos essenciais, como sustentar o crescimento das plantas, fornecer e purificar a água, reciclar nutrientes e resíduos orgânicos, entre outras funções ecológicas (BÜNEMANN et al., 2018).

A qualidade do solo pode ser analisada através de indicadores, que são atributos mensuráveis, (SILVA, 2019), sendo capazes de expressar alterações ocorridas ao longo do tempo num dado ecossistema. Esses indicadores podem ser físicos, químicos e biológicos, e sua avaliação é essencial para garantir a sustentabilidade agrícola e a produtividade das culturas (ARAÚJO et al., 2012).

Os principais indicadores físicos utilizados para avaliar a qualidade do solo são a estrutura, agregação, densidade e porosidade. Esses atributos estão relacionados com as características intrínsecas do solo, tais como textura, superfícies específicas e constituintes minerais, além disso, podem ser alterados com o manejo e uso exercido no solo (REICHARDT; TIMM, 2012).

Para a avaliação dos indicadores químicos do solo são considerados os principais atributos como o pH, teores de alumínio e hidrogênio, capacidade de troca catiônica, concentração de nutrientes como fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, teor de carbono e matéria orgânica. O balanço adequado desses elementos é decisivo para o crescimento saudável e desenvolvimento das plantas a partir do fornecimento de nutrientes (CARDOSO et al., 2013).

Os indicadores biológicos, representam uma abordagem ampla para avaliar e interpretar o impacto das perturbações naturais ou antrópicas no solo (HEGER et al., 2012). Por ser a parte mais viva e ativa da matéria orgânica do solo e por participar de processos bioquímicos importantes, estudos relatam que os indicadores biológicos são mais sensíveis do que os químicos e físicos para detectar alterações no solo decorrentes de seu uso e manejo (STÖCKER et al., 2017). Entre os indicadores biológicos utilizados destacam-se o carbono da biomassa microbiana, nitrogênio da biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico e quociente microbiano (MARCHIORI JÚNIOR, et al., 2000; ARAÚJO, et al., 2007; COSTA et al., 2008; CARVALHO, et al., 2012; KHEYRODIN, et al., 2012; BALOTA et al., 2014; PAREDES JUNIOR, et al., 2015; ZANINETTI, et al., 2016).

De uma maneira geral, é através desses atributos que é possível compreender como as práticas agrícolas afetam a qualidade do solo, e a partir disso desenvolver estratégias de manejo sustentável que assegurem a produtividade a longo prazo. A avaliação contínua da qualidade do solo não apenas ajuda a maximizar a produção agrícola, mas também contribui para a conservação ambiental, mitigando os impactos negativos das práticas agrícolas intensivas e promovendo a sustentabilidade dos ecossistemas. Portanto, avaliar a qualidade do solo permite não apenas entender o estado atual do solo, mas também orientar práticas de manejo que possam melhorar a produtividade.

Práticas agrícolas como plantio direto, o consórcio de lavoura com gramíneas, adoção de sistemas agroecológicos e uso de adubos verdes são essenciais para a manutenção da saúde do solo (ELFSTRAND et al., 2007), pois promovem a melhoria da sua estrutura, reduz a compactação, melhora a porosidade, aumento da matéria orgânica e atividade microbiana, favorecendo o crescimento de raízes das plantas e absorção de água e nutrientes (BRADY; WEIL, 2013; MERLOTI et al., 2023).

Este estudo se justifica pela necessidade de identificar práticas de manejo que promovam a sustentabilidade agrícola, mantendo ou melhorando a qualidade do

solo. Além disso, auxiliará no conhecimento sobre a influência das diferentes práticas de manejo na qualidade do solo, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável que promovam a saúde do solo e a produtividade agrícola a longo prazo.

O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade físico-química e biológica de um solo argiloso, submetido diferentes usos: culturas anuais em plantio direto, culturas anuais com consórcio de *Brachiária* (*Urochloa ruziziensis*), pastagem e área de floresta. E a hipótese é que diferentes usos e manejos do solo têm impactos significativos e quanto maior a intensidade do uso maior será a influência sobre os atributos físicos, químicos e biológicos de um solo argiloso.

A tese está estruturada em dois artigos científicos, como estão descritos a seguir:

- Artigo A: *Indicadores de Qualidade e Estratégias de Manejo: Uma Revisão Sobre a Influência de Diferentes Usos nos Atributos do Solo.*

- Artigo B: *Impactos de diferentes tipos de uso e manejo na qualidade física, química e biológica de um solo argiloso.*

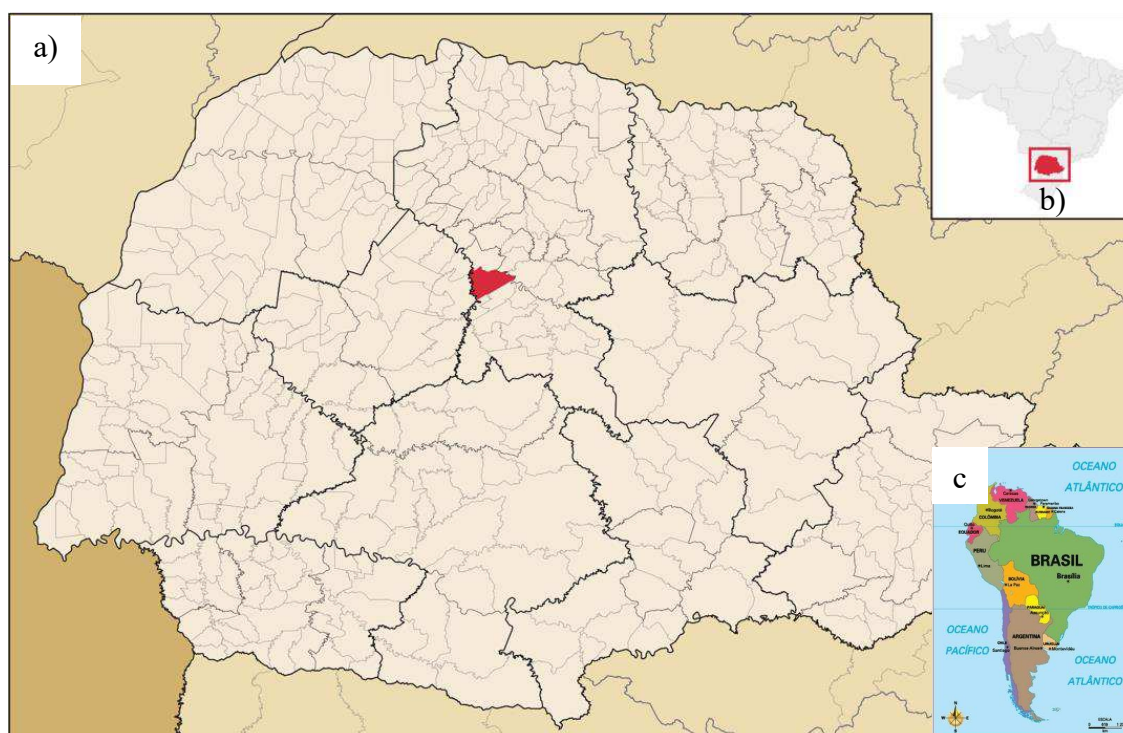
Precedente a apresentação dos artigos científicos, encontra-se a metodologia geral.

## 2. METODOLOGIA GERAL

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As áreas do estudo estão localizadas no município de São João do Ivaí (23° 59' 35" S e 51° 49' 13" W) Estado do Paraná, Brasil, com altitude média de 474 m acima do nível do mar (Figura 1). O clima é classificado como Cfa (Clima subtropical úmido), segundo Köppen-Geiger (KOEPPEN, 1948), com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo, sem estação seca definida (ALVARES et al., 2013).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, o solo das áreas estudadas é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (SANTOS et al., 2018). Os Latossolos são a principal classe de solos encontrada no Estado do Paraná, totalizando 30% do território paranaense (BERTOL et al., 2019). Os Latossolos caracterizam-se por apresentar horizonte B latossólico, matiz 2,5 YR mais avermelhados nos primeiros 100 cm, pouca diferenciação entre horizontes e grande estabilidade de agregados (SANTOS et al., 2018).



**Figura 1.** Localização do município de São João do Ivaí em relação ao Estado do Paraná (a), em relação ao Brasil (b) e relação a América do Sul (c). Fonte: conteúdo aberto em WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre.

O estudo desenvolveu-se em quatro áreas com solo argiloso. A primeira área consiste em um cultivo de culturas anuais em plantio direto sem rotação de culturas citado como tratamento “*lavoura*”. A segunda área consiste em cultivo de culturas anuais com consórcio de *Brachiária (Urochloa ruziziensis)* junto ao milho durante a safra de inverno denominado “*lavoura consorciada*”, esta área recebeu este manejo por quatro safras consecutivas até a data de realização deste trabalho. A terceira área é formada por pastagem que não recebe reforma há mais de dez anos, citada no trabalho como “*pastagem*”. Essa área é ocupada pela *Paspalum notatum*, se destacando pela sua rusticidade, pois se desenvolve bem em variados tipos de solo, inclusive com baixa fertilidade. A quarta área consiste em floresta nativa, sem intervenções antrópicas denominada “*floresta*”.

As áreas ocupadas com culturas anuais e pastagem, originalmente consistiam em vegetação nativa, que posteriormente, com a evolução temporal do uso e manejo do solo, foram convertidas nos usos atuais. A área ocupada com culturas anuais com e sem *Urochloa ruzizientes*, foram desmatadas no início da década de 70, onde foram convertidas para uso agrícola, inicialmente com a culturas de café, algodão e trigo, com preparo de solo convencional.

Na década de 90, o cultivo de soja, milho e trigo fortaleceu-se na região, e essas áreas passaram a serem ocupadas com essas culturas. O plantio direto teve adoção iniciada no final da década de 90 nessas propriedades, porém, sem a realização de rotação de culturas. A partir de 2010, o cultivo de trigo na safra de inverno caiu drasticamente na região, predominando apenas as culturas de soja e milho.

A área de pastagem sempre foi submetida a esse uso desde a retirada da vegetação nativa. Segundo o proprietário, apenas uma reforma foi realizada a mais de 10 anos, essa reforma não envolveu nenhum tipo de adubação química ou correção do solo, apenas operações de revolvimento, como a gradagem e semeadura da pastagem a lanço, com posterior gradagem leve para incorporar as sementes ao solo. O controle de plantas invasoras é realizado através de capina manual, sem aplicação de agrotóxicos na área.

A área ocupada com Floresta Estacional Semidecidual, pertencente ao Bioma Mata Atlântica, considerada nativa, porém, com indícios de antropização. Essa área não passou por derrubadas ou manejos florestais, apresenta-se como originária, com características de floresta primária, como, diversidade de vegetação e estrutura complexa, com diferentes camadas, desde o dossel superior até o sub-bosque,

vegetação densa, com árvores altas e antigas. É comum observar na área, árvores cobertas bromélias, orquídeas, indicando que se trata de uma vegetação preservada e com alta diversidade biológica.

Porém, por se tratar de uma área cercada por propriedades que praticam agricultura, a área de floresta acaba sofrendo influência dos manejos praticados em seu entorno, como por exemplo, deriva de produtos químicos aplicados, carregamento de corretivos, como calcário, pela ação do vento, ação de adubação potássica, que muitas vezes é aplicada a lanço nas áreas de agricultura e acaba atingindo as bordas da floresta, esses motivos levam a conclusão de que, essa área de floresta, mesmo apresentando características vegetativas que a enquadram como nativa, pode apresentar indicadores de um solo que já recebeu algum tipo de manejo.

A escolha das áreas selecionadas se justifica pela proximidade da localização, possuírem a mesma classe de solo, a mesma condição climática e relevos iguais, com manejos conhecidos, o que é um importante fator para a interpretação dos dados e analisar como ocorreu a transição entre floresta nativa para cultivo da pecuária ou agricultura, destacando as mudanças nas práticas agrícolas ao longo das décadas.

A avaliação das alterações do uso do solo ao longo dos anos pode contribuir para o entendimento dos impactos das atividades agrícolas na paisagem e para o planejamento de futuras intervenções na região.

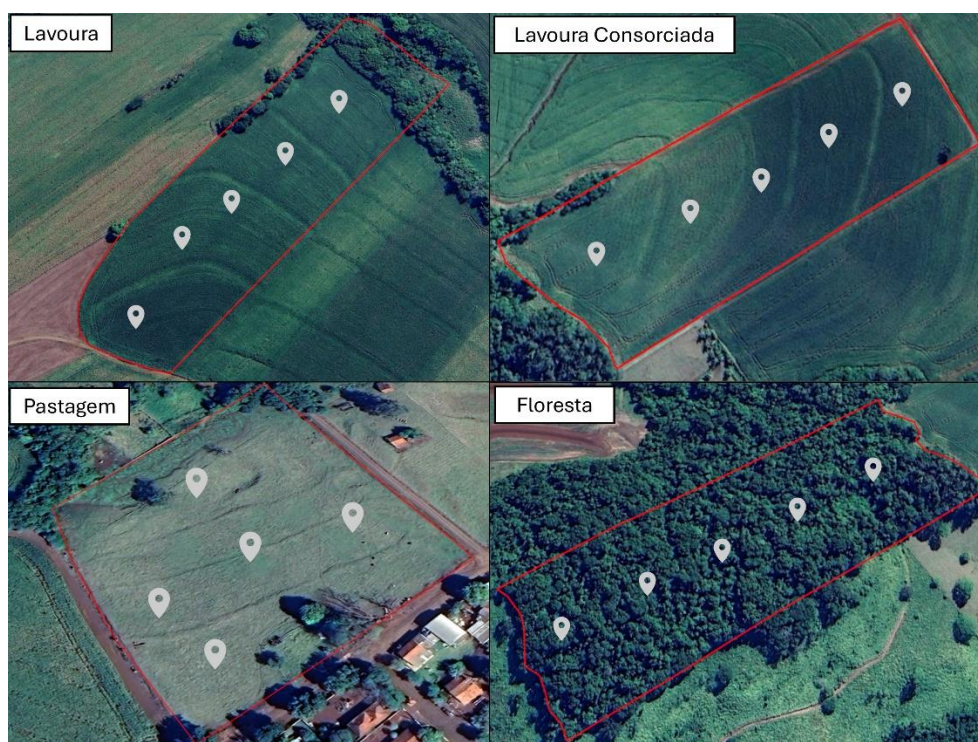
## 2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente causalizado (DIC), uma vez que foram coletadas cinco amostras compostas em triplicata em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm), em quatro ambientes diferentes e com usos distintos, totalizando quatro tratamentos e cinco repetições por área de estudo. Os tratamentos estão descritos na tabela 1.

**Tabela 1.** Descrição dos tratamentos e respectivos usos do solo.

Tratamento	Uso do Solo
Tratamento 01 (T1)	Área cultivada com culturas anuais e sem rotação de culturas ( <i>citado no trabalho como “lavoura”</i> ).
Tratamento 02 (T2)	Área de culturas anuais com consórcio de <i>Urochloa ruziziensis</i> junto ao milho durante a safra de inverno ( <i>citado no trabalho como “lavoura consorciada”</i> ).
Tratamento 03 (T3)	Pastagem ( <i>citado no trabalho como “pastagem”</i> ).
Tratamento 04 (T4)	Floresta Nativa ( <i>citado no trabalho como “floresta”</i> ).

A figura 2 ilustra as áreas de cada tratamento e a distribuição dos pontos de coleta das amostras de solo.



**Figura 2.** Distribuição dos pontos de coleta de amostras de solo em cada uma das áreas estudadas. Fonte: Google Earth.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

### 2.3.1 Determinação dos Atributos Químicos do Solo

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 ( $\text{CaCl}_2$ ) e leitura em pHmetro. O fósforo (P) e potássio (K) foram extraídos com a solução de

Mehlich 1 (HCl a  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ ) e o P determinado por colorimetria em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm e o  $\text{K}^+$  em fotômetro de chama. O cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o alumínio (Al) foram extraídos em KCl a  $1 \text{ mol L}^{-1}$ , 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).

### 2.3.2 Determinação da matéria orgânica e do 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), e oxida as frações de MO mais reativas no solo, onde o carbono do solo é oxidado por uma solução oxidante dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) em meio ácido. O cálculo do COT foi realizado através da equação 1.

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

Determinação do carbono orgânico total, onde:

COT: carbono orgânico total ( $\text{g kg}^{-1}$ );

$V_1$  = Volume de sulfato ferroso gasto na amostra (ml);

$V_2$  = 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 100 g e 0,77 indica a eficiência do método, de 77%).

### 2.3.3 Determinação dos Atributos Físicos do Solo

#### 2.3.3.1 Granulometria

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (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.

#### 2.3.3.2 Argila dispersa em água (ADA), Índice flocculação (IF) e Índice de dispersão (ID)

A argila dispersa em água foi realizada 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 2, de acordo com Tavares Filho (2016).

$$ID (\%) = \frac{ADA}{AT} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo,

ID = índice de dispersão do solo (%);

ADA = argila dispersa em água (g kg<sup>-1</sup>);

Argila total = valor da argila total (g kg<sup>-1</sup>);

O IF foi calculado através da equação 3, de acordo com Tavares Filho (2016).

$$IF = \frac{(AT-ADA)}{AT} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo,

IF = índice de floculação do solo (%);

ADA = argila dispersa em água (g kg<sup>-1</sup>);

AT = Argila total (g kg<sup>-1</sup>);

### 2.3.3.3 Porosidade e Densidade do Solo

A porosidade do solo (porosidade total, macro e micro porosidade) 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 (Ds) foi obtida através do método do anel volumétrico, desenvolvida por Gardner (GARDNER, 1958).

### 2.3.3.4 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). Esses índices quantitativos 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 e Rosenau (1986) é dado pela equação 4.

$$DMP = \sum_{i=1}^n xi * wi \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo,

DMP = Diâmetro Médio Ponderado (mm);

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

wi = 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 e Rosenau (1986) é dado pela equação 5.

$$DMG = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n wi \times \log xi}{\sum_{i=1}^n wi} \right] \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo,

DMG = Diâmetro Médio Geométrico (mm);

wi = peso de agregados (g) dentro de uma classe de agregados de diâmetro médio xi;

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

O índice de estabilidade de agregados (IEA) em água foi calculada como a proporção da massa dos agregados retidos na peneira em relação à massa inicial do solo adicionado ao recipiente de ensaio, e é expressa 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 6.

$$IEA = \frac{\text{Peso da amostra seca} - \text{wp25} - \text{argila}}{\text{Peso da amostra seca} - \text{areia}} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

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).

#### 2.3.4 Determinação dos Atributos Biológicos do Solo

##### 2.3.4.1 Respiração Basal do Solo (RBS)

A respiração basal do solo, relacionada a atividade microbiana, foi determinada a partir da liberação de CO<sub>2</sub>, via degradação da matéria orgânica do solo, nas amostras não-fumigadas após um período de 5 a 10 dias de incubação, pelo método da incubação, proposto por Jenkinson e Powlson (1976) e adaptado por Silva, Azevedo e De-Polli (2007) e expresso em mg C-CO<sub>2</sub> Kg solo<sup>-1</sup> hora<sup>-1</sup>.

Foram pesados 50 g de solo das amostras, em duplicatas, e acondicionadas em vidro hermético de 100 ml. Dentro do vidro foi colocado um frasco de 30 ml contendo 10 ml de hidróxido de sódio, NaOH 1 M. Imediatamente após isso, o vidro foi selado com plástico filme para evitar a entrada de CO<sub>2</sub> do ar externo ou fuga de CO<sub>2</sub> internamente produzido. Também foram feitas três amostras sem o solo, sendo estas as amostras para controle.

Em seguida, as amostras foram alocadas em estufa B.O.D. (demanda bioquímica de oxigênio) a 26,5 °C para iniciar a incubação durante 10 dias. Foi

anotado a data e a hora do início da incubação para efeito de cálculo. Após o processo de incubação, que foi de 210 horas em média, os frascos contendo NaOH foram retirados do vidro e, imediatamente à abertura, foi adicionado 2 ml de cloreto de bário 10%, BaCl<sub>2</sub>, para a completa precipitação do CO<sub>2</sub>. Foi adicionado 2 gotas de fenolftaleína, C<sub>2</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub>, 1% dissolvida em etanol, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, e foi titulado sob agitação magnética com HCl 0,5 M, até o analito mudar da coloração rosa à incolor. Após isso, foi determinado a exata molaridade do HCl, utilizando 50 mL da solução THAM (tris-hidroxi-amino-metano), C<sub>4</sub>H<sub>11</sub>NO<sub>3</sub> 0,03 M, em seguida foi adicionado 10 ml da solução de ácido bórico, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 1%, e foi titulado sob agitação magnética com o HCl 0,5 M, onde a coloração foi de verde para rosa. O cálculo da RBS é dado pela equação 7.

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

Determinação da respiração basal do solo, onde:

RBS (mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> solo hora<sup>-1</sup>) = carbono oriundo da respiração basal do solo;

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

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

M = molaridade exata do HCl;

Ps (g) = massa de solo seco e,

T = tempo de incubação da amostra em horas.

#### 2.3.4.2 Biomassa Microbiana

Os níveis de carbono da biomassa microbiana (CBM) foram analisados pelo método de clorofórmio fumigação-extração, proposto por Vance et al. (1987). Para os níveis do nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) foi utilizado o método proposto por Brookes et al. (1985).

Para determinar os níveis de CBM através do método de Clorofórmio Fumigação-Extração (CFE), iniciou-se com a secagem das amostras de solo, em seguida foram peneiradas para remover os detritos. A fumigação foi realizada para destruir a biomassa microbiana viva presente no solo, e para isso, adicionado uma quantidade conhecida de clorofórmio líquido a cada amostra de solo em um

recipiente hermético. Após a fumigação, o carbono da biomassa microbiana morta é extraído do solo, com uma solução de hidróxido de potássio (KOH) ou um agente de extração semelhante, que solubiliza o carbono orgânico. A quantidade de carbono extraído é determinada utilizando um método colorimétrico ou titrimétrico.

Para a determinação do nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), foram pesados 0,5 g de catalisador  $K_2SO_4 + CuSO_4$  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.

#### 2.3.4.3 Quociente Metabólico ( $qCO_2$ )

O  $qCO_2$  é a razão entre a respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo conforme descrito por Silva et al. (2007), e tem sido usado para estimar a eficiência do uso de substrato pelos microrganismos do solo (ANDERSON; DOMSCH, 1993), podendo ser utilizado como sensível indicador de estresse quando a CBM é afetada. O cálculo  $qCO_2$  da respiração basal do solo é dado pela equação 8.

$$qCO_2 = \frac{RBS(mg\ C-CO_2\ kg^{-1}\ solo\ h^{-1})}{CBM(mg\ C\ kg^{-1}\ solo)*10^{-3}} \quad (\text{Equação 8})$$

Determinação do quociente metabólico do solo, onde:

$qCO_2$  = Quociente metabólico do solo ( $mg\ C-CO_2\ g^{-1}\ CBM\ h^{-1}$ ).

RBS = Respiração basal do solo ( $mg\ de\ C-CO_2\ kg^{-1}\ h^{-1}$ ).

CBM = Carbono da biomassa microbiana do solo ( $mg\ de\ CO_2\ kg^{-1}$ ).

#### 2.3.4.4 Quociente Microbiano (qMic)

O quociente microbiano é relação entre o CBM e o COT, conforme descrito por Anderson e Domsch (1993), sendo expresso em porcentagem, e indica a quantidade de carbono que está imobilizado na biomassa microbiana. O qMic do solo é estimado pela equação 9.

$$qMic = \frac{CBM}{COT} \quad (\text{Equação 9})$$

Determinação do quociente microbiano do solo, onde:

CBM = Carbono da biomassa microbiana do solo (mg de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>).

COT = Carbono orgânico total (mg.kg<sup>-1</sup>).

#### 2.3.5 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey em 5% de probabilidade. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada para facilitar a visualização de dados multidimensionais em gráficos bidimensionais, ajudando a identificar padrões, tendências e agrupamentos que não seriam visíveis em dimensões mais altas. Na análise de PCA foi identificado quais variáveis são mais importantes para explicar a variabilidade dos dados em cada área de estudo.

As variáveis também foram submetidas a análise de correlação de Pearson para verificar se existe relação entre os indicadores avaliados, e no caso de existência de relação, se é positiva ou negativa. Todas as análises foram realizadas usando o ambiente R v.3.4.3 (R Core Team, 2023).

### 3. ARTIGO A - INDICADORES DE QUALIDADE E ESTRATÉGIAS DE MANEJO: UMA REVISÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES USOS NOS ATRIBUTOS DO SOLO.

#### 3.1 RESUMO

O solo é crucial para a agricultura e a sustentabilidade dos ecossistemas. Sua qualidade depende de atributos físicos, químicos e biológicos, influenciando a capacidade de sustentar a vida e os ciclos naturais regulares. Monitorar esses aspectos é essencial, especialmente em usos intensivos como agricultura e silvicultura. Indicadores físicos, químicos e biológicos ajudam a avaliar a saúde do solo. Essa revisão tem como objetivo analisar os principais indicadores de qualidade do solo e as estratégias de manejo que influenciam esses atributos, explorando o impacto de diferentes usos do solo na manutenção e recuperação da sua qualidade. Os indicadores de qualidade destacam a importância de práticas agrícolas favoráveis para preservar e melhorar a qualidade do solo. Práticas como o plantio direto, a rotação de culturas e a adubação verde são eficazes para mitigar os impactos negativos do manejo incorreto. A adoção dessas práticas contribui não somente para a produtividade agrícola, mas também para a conservação dos recursos naturais, essenciais em um contexto de mudanças climáticas e expansão agrícola. Estudos como este, contribuem para uma visão mais integrada dos ecossistemas, objetivando um maior esclarecimento sobre os aspectos que ajudam a determinar a influência dos diferentes usos nos atributos de qualidade do solo.

**Palavras-chave:** sustentabilidade; agroecossistemas; usos do solo; indicadores de qualidade.

#### 3.2 ABSTRACT

Soil is crucial for agriculture and ecosystem sustainability. Its quality depends on physical, chemical and biological attributes, influencing its ability to sustain life and regular natural cycles. Monitoring these aspects is essential, especially in intensive uses such as agriculture and forestry. Physical, chemical and biological indicators help to assess soil health. This review aims to analyze the main soil quality indicators and the management strategies that influence these attributes, exploring the impact of different soil uses on the maintenance and recovery of soil quality. Quality indicators highlight the importance of favorable agricultural practices to preserve and improve soil quality. Practices such as no-till farming, crop rotation and green manure are effective in mitigating the negative impacts of incorrect management. The adoption of these practices contributes not only to agricultural productivity, but also to the conservation of natural resources, essential in a context of climate change and agricultural expansion. Studies like this contribute to a more integrated view of ecosystems, aiming to provide greater clarification on the aspects that help determine the influence of different uses on soil quality attributes.

**Keywords:** sustainability; agroecosystems; land use; quality indicators.

### 3.3 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural fundamental para a manutenção da produtividade agrícola e para a sustentabilidade dos ecossistemas. A qualidade do solo, definida por seus atributos físicos, químicos e biológicos, está diretamente relacionada à sua capacidade de sustentar a vida, regular os ciclos hidrológicos e sustentar a biodiversidade do solo.

O monitoramento da qualidade do solo, por meio de indicadores que refletem o estado de seus atributos, tem ganhado crescente importância (LAL e PIERCE, 1991; MUKHERJEE e LAL, 2014; LOPES et al., 2023). A busca por sistemas de manejo que preservem ou melhorem esses indicadores é essencial, especialmente em contextos de uso intensivo do solo, como na agricultura e silvicultura.

Diversos indicadores de qualidade do solo são amplamente utilizados na pesquisa científica para avaliar os efeitos de diferentes práticas de manejo. Indicadores físicos, como a densidade do solo, a capacidade de retenção de água e a resistência à penetração de raízes, são determinantes na avaliação da compactação e da porosidade do solo, sendo afetados pelo uso de maquinário pesado em sistemas de monocultura intensiva (VEZZANI e MIELNICZUK (2009); RAUBER et al., 2018).

Indicadores químicos, como o pH, a matéria orgânica e a concentração de nutrientes, refletem a fertilidade do solo e sua capacidade de sustentar a produção agrícola (OLIVEIRA SILVA et al., 2020; CARDOSO et al., 2011). Os indicadores biológicos, como a atividade microbiana e a quantidade de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana fornecem informações importantes sobre a saúde do ecossistema do solo e a resiliência do solo diante de práticas agrícolas inadequadas (SILVA et al., 2021; PEREIRA et al., 2024).

O impacto de diferentes usos do solo, como a agricultura intensiva, a pecuária e as florestas plantadas, varia consideravelmente de acordo com as práticas de manejo adotadas e as características específicas de cada ecossistema. Estudos indicam que a monocultura e o uso intensivo de fertilizantes químicos podem levar à compactação do solo e à perda de sua fertilidade natural (PEIXOTO et al., 2020; ARAÚJO et al., 2011). As consequências de práticas inadequadas de manejo e o uso agrícola intensivo do solo incluem compactação, erosão, redução da matéria orgânica, deterioração biológica, contaminação do solo e diminuição da sua

capacidade de resistência (PEIXOTO et al., 2020; LI et al., 2013; MOEBIUS-CLUNE et al., 2007). Assim, a avaliação dos indicadores de qualidade do solo é crucial para orientar práticas agrícolas que conciliem produtividade com conservação ambiental.

Estratégias de manejo sustentável do solo, como o plantio direto, a rotação de culturas, a adubação verde e os sistemas agroflorestais, têm sido amplamente promovidas como alternativas para mitigar os efeitos negativos da agricultura intensiva sobre a qualidade do solo (CAIRES, 2013; BHADURI et al., 2017; STELLACCI et al., 2021). Essas estratégias oferecem uma abordagem mais equilibrada e sustentável.

O plantio direto, por exemplo, ajuda a aumentar o teor de matéria orgânica e a reduzir a erosão, enquanto os sistemas agroflorestais contribuem para a manutenção da biodiversidade e a ciclagem de nutrientes (CAIRES, 2013; CORDEIRO et al., 2015; DERPSCH et al., 2010). Essas práticas são fundamentais para minimizar a degradação do solo e promover a sua recuperação em áreas degradadas, assegurando a sustentabilidade da produção agrícola.

Essa revisão tem como objetivo analisar os principais indicadores de qualidade do solo e as estratégias de manejo que influenciam esses atributos, explorando o impacto de diferentes usos do solo na manutenção e recuperação da sua qualidade.

### 3.4 OCUPAÇÃO E USO DOS AGRÍCOLAS NO BRASIL

Ocupação e uso do solo agrícola são conceitos centrais para entender a dinâmica da agropecuária e seu impacto ambiental. Ocupação refere-se à apropriação física do território para práticas agrícolas, enquanto o uso do solo está relacionado às técnicas aplicadas, como cultivo, pastagem e irrigação (MANZATTO et al., 2002). Essas práticas influenciam diretamente a fertilidade do solo e a sustentabilidade das atividades agropecuárias. O uso inadequado ou intensivo pode levar à degradação do solo, comprometendo sua capacidade produtiva, como observado em diversas regiões agrícolas do Brasil (MATOSO et al., 2015).

O Brasil é um dos maiores países agrícolas do mundo, com vastos territórios destinados à produção de commodities como soja, milho, cana-de-açúcar, algodão, entre outros. Ao mesmo tempo, o país possui uma variedade de solos que, quando bem manejados, sustentam uma agricultura altamente produtiva. No entanto, o manejo inadequado pode resultar em sérios problemas ambientais. Estudos indicam

que a conversão de biomas naturais para áreas agrícolas tem reduzido significativamente a cobertura vegetal e aumentado a pressão sobre os solos, especialmente no Cerrado (FRANÇA et al., 2017).

Todas as formas de uso e ocupação devem adotar práticas conservacionistas de proteção das características físicas, químicas e biológicas. A sustentabilidade no uso do solo é fundamental para a competitividade do Brasil no cenário global. Para manter sua posição de liderança, é necessário implementar práticas de manejo que não comprometam a fertilidade.

A expansão da produção agrícola no país, principalmente no Cerrado, resultou na perda de grandes áreas de vegetação natural, que foram substituídas por monoculturas como soja e milho (POLIZEL et al., 2021). Os impactos ambientais dessa expansão são significativos. A degradação do solo, a perda de biodiversidade e o aumento da emissão de gases de efeito estufa são algumas das consequências mais graves (OKA-FIORI et al., 2003).

O uso intensivo dos solos agrícolas sem o manejo adequado leva à degradação da qualidade do solo. A erosão, a compactação e a perda de nutrientes são problemas recorrentes em áreas de monocultura. A ação humana tem acelerado esses processos de forma intensa, causando prejuízos ao setor agrícola e ao meio ambiente, com reflexos econômicos e sociais. Guerra et al. (2014) ressaltam a importância das ações preventivas e salientam a vulnerabilidade dos solos brasileiros à erosão hídrica, apontada como o principal fator responsável pelo esgotamento da capacidade produtiva desses solos.

Pinheiro et al. (2011) enfatizam que o uso e ocupação inadequados dos solos agrícolas têm intensificado a perda gradual da sua capacidade produtiva e contribuído para a degradação dos recursos hídricos, devido à sedimentação e poluição. O aprimoramento e o desenvolvimento de novas tecnologias, juntamente com a criação de instrumentos normativos, permitiram a realização de análises mais detalhadas sobre os impactos na natureza, com o objetivo de monitorar e avaliar os danos causados ao meio ambiente (TEIXEIRA E AZEVEDO, 2009).

Para mitigar esses impactos, diversas práticas conservacionistas têm sido implementadas. O plantio direto, a rotação de culturas e o uso de adubos verdes são algumas das técnicas que ajudam a manter a saúde do solo e a aumentar a produtividade (SILVA et al., 2024; ANGON et al., 2023; RUSINAMHODZI, 2020; RAPHAEL et al., 2016; ANDERSON, 2015). O zoneamento agroecológico é outra

estratégia importante, que permite identificar áreas com aptidão agrícola, evitando o uso inadequado do solo e promovendo a sustentabilidade das práticas agrícolas (FRANCISCO et al., 2015).

A ocupação e o uso dos solos agrícolas no Brasil são temas de extrema relevância, especialmente em um país com tamanha diversidade de biomas e uma economia fortemente dependente do agronegócio. A expansão agrícola deve ser acompanhada por práticas de manejo sustentável para evitar a degradação dos solos e garantir a produtividade a longo prazo. O futuro da agricultura no Brasil dependerá da capacidade de conciliar a produção com a conservação dos recursos naturais, assegurando a sustentabilidade para as próximas gerações.

### 3.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A OCUPAÇÃO E O USO DO SOLO AGRÍCOLA

O crescimento populacional aumenta a demanda por alimentos e expande as fronteiras agrícolas. No Brasil, a modernização agrícola impulsionou a ocupação de áreas como o Cerrado e a Amazônia, muitas vezes sem práticas sustentáveis, causando conflitos de uso da terra e degradação dos solos (MATOSO et al., 2015). O uso intensivo do solo para monoculturas, como a soja, também gerou impactos ambientais significativos, incluindo a perda de vegetação nativa e a degradação dos recursos hídricos (COBRA et al., 2019).

Por outro lado, a modernização agrícola, promovida pela globalização e pela demanda internacional por commodities, introduziu sistemas de produção mais intensivos e mecanizados. A globalização também tem trazido novas tecnologias e insumos para o Brasil, permitindo um aumento significativo na produtividade agrícola, mas ao mesmo tempo gerando desafios em termos de sustentabilidade ambiental e manutenção da fertilidade do solo.

A degradação resultante do uso intensivo do solo sem manejo adequado, compromete a capacidade agrícola produtiva. A expansão do cultivo de cana-de-açúcar e pastagens em áreas anteriormente florestadas tem aumentado a compactação e a erosão dos solos. No estudo de Paranhos Filho et al. (2004), os autores concluíram que o desmatamento em uma bacia em MS resultou em um aumento de mais de 50 vezes na taxa de erosão laminar dos solos entre 1966 e 1996.

Alguns fatores naturais desempenham um papel central na definição da aptidão das terras para atividades agrícolas. O clima é um determinante na produtividade agrícola, com áreas tropicais e subtropicais sendo mais propícias a determinados tipos de cultivo. No Brasil, as condições edafoclimáticas influenciam diretamente a escolha das culturas e o manejo do solo. O relevo também é um fator importante, já que terrenos planos facilitam a mecanização agrícola, enquanto áreas montanhosas ou com declividade acentuada são mais propensas à erosão, exigindo técnicas específicas de manejo (LIRA et al., 2016).

Os impactos ambientais da ocupação e do uso do solo no Brasil são extensos, afetando tanto a biodiversidade quanto a saúde dos solos. Integrar sistemas de produção tradicionais e modernos, juntamente com o conhecimento técnico de manejo, é crucial para adotar práticas mais sustentáveis que assegurem a produtividade e a conservação dos solos.

### 3.6 SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO

O manejo do solo é uma prática fundamental para garantir a produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental. Diferentes sistemas de manejo têm sido desenvolvidos para atender às necessidades específicas de cada tipo de solo e cultivo, além de minimizar os impactos ambientais. A seguir, serão apresentados os principais sistemas de manejo utilizados na agricultura.

O plantio direto é um sistema em que o solo não é revolvido entre as colheitas, mantendo-se uma cobertura permanente com palha ou resíduos vegetais (GASSEN E GASSEN, 1996). Essa prática tem sido amplamente adotada no Brasil, particularmente em áreas de produção de grãos no Cerrado, devido aos seus benefícios na conservação do solo e na melhoria da matéria orgânica. O plantio direto reduz a erosão do solo, melhora a infiltração de água, melhora a fertilidade natural, aumenta a biomassa do solo e a retenção de umidade (GASSEN E GASSEN, 1996; SÁ, 1999).

Santos et al. (2019) compararam as perdas de solo e água em diferentes sistemas de manejo, incluindo o plantio direto e o sistema convencional, mostrando que o plantio direto resulta em menores perdas de solo, com infiltração superior a 93% para o plantio direto e 71% para o convencional. Os desafios são o controle de

pragas e doenças (MURRELL, 2020), que podem se acumular nos resíduos vegetais, e a compactação do solo (PEIXOTO et al., 2020).

O plantio direto, prática que se opõe ao manejo convencional e visa eliminação das operações de revolvimento do solo, é uma alternativa viável para proporcionar a melhoria da qualidade do solo, garantindo manutenção da produção (CAIRES, 2013; 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. Além disso, observaram níveis mais elevados de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo em ambos os sistemas de plantio direto.

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., 2019). Nessas operações de preparo do solo ocorrem uma diminuição dos teores de carbono orgânico e aumento do fluxo de CO<sub>2</sub> 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., 2019).

A rotação de culturas envolve o cultivo alternado de diferentes culturas no mesmo local. Essa técnica é excelente para a saúde do solo, pois diferentes culturas utilizam nutrientes variados e ajudam a interromper o ciclo de pragas e doenças (ZOHRY e OUDA, 2018). Além de melhorar a estrutura do solo e reduzir a erosão, a rotação de culturas aumenta a biodiversidade no solo e pode reduzir a dependência de fertilizantes químicos e pesticidas (STELLACCI et al., 2021).

Culturas de leguminosas, como a soja, fixam nitrogênio no solo, melhorando sua fertilidade para culturas subsequentes (OLIVEIRA SILVA et al., 2020). A implementação adequada da rotação de culturas pode ser difícil em sistemas de monocultura intensiva, como soja e milho, que dominam grandes áreas agrícolas. Além disso, a rotação requer planejamento rigoroso e conhecimento das necessidades nutricionais das diferentes culturas.

A adubação verde envolve o plantio de culturas específicas, como leguminosas, que são posteriormente incorporadas ao solo para melhorar sua fertilidade e

estrutura. Essas culturas, ao serem incorporadas, aumentam o teor de matéria orgânica, melhora sua estrutura, aumenta a capacidade de retenção de água e melhoram a disponibilidade de nutrientes no solo (BHADURI et al., 2017).

Além disso, as plantas utilizadas para adubação verde podem fixar nitrogênio no solo, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos (LIMA FILHO et al., 2014). O desafio da adubação verde está relacionado ao planejamento, pois ela requer um período antes que os benefícios sejam observados.

O manejo adequado do solo tem como finalidade criar condições estruturais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas, tanto da parte aérea quanto nas raízes. Dependendo do manejo exercido sobre o solo, várias mudanças das propriedades físicas do solo como, na densidade e porosidade, podendo dificultar a infiltração de água e promover processos erosivos (IBRAHIM E ALIYU, 2016). Quando um ambiente natural sofre alteração, na maioria das vezes para implantação de sistemas agrícolas com manejos intensivos, como o cultivo de culturas anuais em sucessão, é observada uma redução na quantidade de matéria orgânica do solo (NANZER, et al., 2019).

De acordo com o sistema de manejo empregado, o solo pode sofrer diversas modificações estruturais. Sistemas convencionais de manejo, com revolvimento constante do solo, maiores mudanças estruturais acontecem, uma vez que nesse sistema de manejo, a camada superficial do solo é revolvida, tornando-o mais suscetível a erosão (TAVARES FILHO et al., 2010).

Até mesmo sistemas como o plantio direto, desenvolvido para mitigar os efeitos de degradação do solo, causa certo grau de compactação de superfície, caracterizado pelo aumento de densidade do solo e redução da porosidade total (TORMENA, et al., 1998; De Maria et al., 1999), prejudicando o desenvolvimento das raízes das plantas cultivadas. Sistemas com manejos convencionais propiciam uma maior degradação das propriedades do solo, quando comparados com manejos que utilizam práticas que visam a preservação e manutenção da integridade do solo.

A adoção de sistemas de manejo que introduzam continuamente resíduos orgânicos no solo são fundamentais para preservar uma boa estrutura do solo (TAVARES FILHO e TESSIER, 2010), com menor densidade aparente e adequada distribuição de macro e microporos (SCHAFFRATH et al., 2008; LUCIANO et al., 2010). Para Jakelaitis et al. (2008) sistemas agrícolas exerceram influência direta sobre a qualidade do solo sendo que a interação entre agricultura e cultivo forrageiro,

levou a uma qualidade do ambiente edáfico superior comparado com o monocultivo, quer seja com milho ou pastagem exclusiva.

A adoção de plantas de cobertura contribui intensamente para a estabilidade dos agregados do solo, isso graças a decomposição da biomassa, exsudação das raízes (ROJAS et al., 2018), aumento do carbono orgânico do solo (ZANATTA et al., 2007), e mudanças na atividade de microrganismos (SHARMA et al., 2015). Estudando sistemas convencionais e conservacionistas de preparo de solo, Simon et al. (2019) observaram elevações na emissão de CO<sub>2</sub> e temperatura do solo no sistema convencional. 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 mata sem ação antrópica e que os sistemas de preparo de solo interferem negativamente em seus atributos. Um solo mal manejado será conseqüentemente mal estruturado, e dessa forma não terá estabilidade de agregados, com porosidade restrita, distribuição inadequada de macro e microporos, acarretando deficiências no transporte de nutrientes, infiltração de água, penetração e exploração do sistema radicular (REDMILE-GORDON et al., 2020).

Diversos estudos têm evidenciado que a conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas altera a entrada de resíduos orgânicos e sua taxa de decomposição (ARAÚJO et al., 2011; CARDOSO et al., 2015; PEGORARO et al., 2018; SANTOS et al., 2019). Sendo que as perdas de carbono orgânico e nitrogênio total se intensificam em sistemas de cultivo convencionais (PARANHOS FILHO et al., 2004).

Desta forma, é possível afirmar que as práticas agrícolas que envolvem sistemas conservacionistas possibilitam a entrada e manutenção de carbono no sistema solo-planta, diferentemente do que acontece em manejos onde prevalecem práticas que degradam a qualidade ambiental, como desmatamento, queimadas e revolvimento do solo.

Os sistemas de manejo do solo desempenham um papel crucial para a sustentabilidade e produtividade da agricultura. Práticas como plantio direto, rotação de culturas e adubação verde oferecem soluções para melhorar a saúde do solo e preservar os recursos naturais. No entanto, a implementação desses sistemas exige planejamento e conhecimento técnico, além de políticas públicas que incentivem sua adoção em larga escala.

### 3.7 QUALIDADE DO SOLO

O conceito de qualidade do solo está intrinsecamente relacionado à capacidade do solo de sustentar a produtividade vegetal e animal, preservar a qualidade da água e do ar, além de apoiar a saúde humana e habitacional (ARAÚJO et al., 2012). É difícil chegar em um consenso sobre o termo “qualidade do solo”, devido a complexidade dos fatores que envolvem esse conceito, neste sentido, Doran e Parkin (1994), foram os primeiros a propor uma definição mais ampla sobre o assunto. Eles consideram que a qualidade do solo reflete sua capacidade de atuar no ecossistema para preservar o meio ambiente e sustentar os sistemas produtivos. Essa visão considera o papel do solo não apenas na agricultura, mas também suas funções ecológicas, garantindo a sustentabilidade agrícola a longo prazo.

Devido a essa complexidade em se estabelecer parâmetros de estimativa da qualidade do solo, é necessário partir de indicadores, que são atributos mensuráveis que envolvem aspectos físicos, químicos e biológicos do solo. (ARAÚJO et al., 2012; ANDREWS et al., 2004). Os indicadores da qualidade física do solo são determinantes para o crescimento radicular e a retenção de água e nutrientes.

Segundo Vezzani e Mielniczuk (2009), os principais atributos do solo usados como indicadores de qualidade também são divididos em três categorias principais:

a) indicadores físicos: incluem atributos como textura do solo, densidade, porosidade, capacidade de infiltração de água, estabilidade dos agregados e profundidade das raízes;

b) indicadores químicos: a matéria orgânica do solo, pH, capacidade de troca de cátions, teores de nutrientes como nitrogênio e fósforo, e condutividade elétrica;

c) indicadores biológicos: biomassa microbiana, respiração do solo, quociente metabólico e atividade enzimática. A matéria orgânica do solo também é vista como um importante indicador biológico, pois está relacionada diretamente com a saúde e a sustentabilidade do solo.

Segundo Araújo et al. (2012) não existe um método prático e definitivo para avaliar a qualidade do solo. No entanto, os autores destacam a importância de se utilizar uma combinação de indicadores para mensurar o estado e as mudanças na qualidade do solo ao longo do tempo. O estudo de Vezzani e Mielniczuk (2009) alertaram para a importância do solo na sustentabilidade e começaram a discutir o conceito de qualidade do solo no contexto da degradação ambiental e da busca por

sistemas de manejo sustentáveis.

O termo *Qualidade do Solo* surgiu no início da década de 1990, quando a comunidade científica começou a focar na relação entre manejo do solo e sustentabilidade agrícola, principalmente após os estudos de Lal e Pierce (1991) e impulsionados por autores como Karlen e Stott (1994).

O estudo de Lopes et al. (2023) faz uma revisão sistemática dos estudos realizados no Brasil sobre a qualidade do solo entre 1990 e 2021. O estudo utiliza análises textuais para identificar as principais tendências e abordagens desses estudos ao longo do tempo e entre as regiões geográficas. Os autores advertem que o termo *Qualidade do Solo* se refere à capacidade do solo de desempenhar suas funções ecossistêmicas, como suporte à produção agrícola, regulação da água e manutenção da biodiversidade.

Essa revisão de Lopes et al. (2023) revelou que entre 1990 e 2000, a qualidade do solo foi associada principalmente a atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com foco em práticas conservacionistas. A partir de 2001, a qualidade do solo começou a ser relacionada principalmente a atributos físicos, como a densidade do solo e a capacidade de infiltração de água. Entre 2011 e 2021, os estudos se concentraram nos estoques de carbono e nitrogênio como principais indicadores. Os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total foram destacados como os principais indicadores de qualidade do solo em praticamente todas as regiões e períodos analisados.

Outros pesquisadores incorporam o conceito de *Saúde e Qualidade do Solo* (LAISHRAM et al., 2012), de forma que o manejo aplicado garanta a qualidade do solo de forma duradoura, com viabilidade econômica ao produtor rural (BREVİK et al., 2022). A avaliação da qualidade do solo jamais deve ser realizada de forma isolada, deve considerar a qualidade ambiental, a sustentabilidade agrônômica e a viabilidade socioeconômica (MUKHERJEE e LAL, 2014).

Os indicadores de qualidade do solo são atributos mensuráveis, podendo apresentar-se de forma quantitativa e qualitativa (SILVA, 2019). Estudar esses atributos torna possível a quantificação e intensidade das alterações provocadas em solos submetidos a diferentes tipos de manejo (FREITAS et al., 2017). Os indicadores de qualidade do solo podem ser categorizados como uma fonte de informação sobre o aspecto específico sob avaliação, oferecendo uma representação da sustentabilidade do ecossistema em questão (SILVA et al., 2023).

A avaliação da qualidade do solo visa uma compreensão do solo como um sistema complexo e dinâmico, abrangendo a interpretação dos processos produtivos, a restauração de áreas degradadas e a conservação dos recursos naturais. A ausência de um estudo prévio do potencial agrícola ao aplicar práticas de manejo do solo resulta na degradação dos ecossistemas essenciais para a preservação da qualidade do solo (SILVA et al., 2023).

Para isso, é necessário investigar esses aspectos sob diferentes perspectivas, considerando a inter-relação com as funções e serviços ecossistêmicos associados, com o intuito de avaliar a integralidade dos estudos de qualidade do solo (SIMON et al., 2022).

### 3.7.1 Indicadores de Qualidade Física do Solo

Os atributos físicos do solo são importantes indicadores da qualidade do solo pois influenciam diretamente a capacidade do solo de sustentar o crescimento das plantas, regular a água e promover a saúde geral do ecossistema. A estrutura do solo, que inclui a forma, tamanho e estabilidade dos agregados, afeta a aeração, retenção de água e a resistência à erosão (LIU et al., 2006). A compreensão e manejo adequado desses atributos são fundamentais para promover a sustentabilidade agrícola e a conservação dos recursos naturais.

Estudos relacionados com o manejo, agregação e estrutura dos solos são a fonte de informações básicas para estudos futuros relacionados a agronomia, hidrologia, ecologia e problemas ambientais (REICHERT et al., 2020). O manejo além de influenciar no armazenamento de carbono orgânico do solo, também pode exercer influência na agregação do solo, principalmente nos macroagregados (QIU et al., 2012).

A estrutura e agregação do solo são altamente influenciadas pelo manejo (XIAO et al., 2020). De maneira geral, com a intensificação do manejo do solo nos sistemas agrícolas, intensificaram-se também as modificações estruturais desses solos, como mudanças na forma do agregado, tamanho e estabilidade (TAVARES FILHO et al., 2010).

A estrutura é uma propriedade alterada pelo manejo e pode ser avaliada segundo as variáveis de estabilidade, tamanhos e formas dos agregados presentes no solo (TAVARES FILHO et al., 2010). No estudo de Falcão et al. (2020), a

agregação do solo foi maior nos sistemas que mantiveram a cobertura vegetal, como pastagem permanente e plantio direto, em comparação com o solo exposto e o preparo convencional. Esses sistemas de manejo conservacionista contribuem para a melhoria da estrutura do solo, prevenindo a erosão e melhorando a retenção de água e nutrientes.

Para Silva et al. (2022), o sistema de manejo campo nativo apresentou 76,4% de solo agregado, dos quais 63,8% eram macroagregados. Esse sistema reflete a estrutura bem preservada do solo sob condições naturais. Os mesmos autores reportaram que o manejo agrícola intensivo com lavoura, que envolveu revolvimento intenso e baixa adição de resíduos por 30 anos, resultou em uma redução significativa na agregação do solo, com apenas 49,9% de solo agregado, sendo 22,8% de macroagregados. Isso foi atribuído à quebra mecânica dos agregados e à perda de matéria orgânica.

O plantio direto com consórcios de culturas aumentou a proporção de solo agregado para 70,7%, com 53,5% de macroagregados, mostrando recuperação significativa da estrutura do solo sem revolvimento (SILVA et al., 2022). Esses resultados indicam que práticas de manejo sem revolvimento, com maior diversidade de plantas e adição de resíduos vegetais, são eficazes na recuperação da estrutura do solo comparadas ao manejo intensivo com revolvimento.

A densidade do solo é outro fator determinante para a avaliação da qualidade do solo, uma vez que é definida como a relação entre massa e volume ocupados. O aumento da densidade é caracterizado pela diminuição dos espaços porosos em função da aplicação de força externa, dificultando a penetração das raízes, sendo um indicador extremamente sensível de acordo com o manejo integrado (TORMENA et al., 1998; MOTA et al., 2013).

A densidade de um solo pode ser influenciada por vários fatores, dentre eles, o tipo de cobertura vegetal, resíduos presentes na superfície do solo e a matéria orgânica (FERREIRA, 2015). Segundo Ferreira et al. (2010), o manejo inadequado, especialmente em pastagens extensivas, aumentou a densidade do solo, o que é prejudicial ao desenvolvimento radicular e à saúde do solo. Valores de densidade acima do limite crítico ( $1,4 \text{ g/cm}^3$ ) foram encontrados em áreas degradadas. Para os mesmos autores, a compactação e a redução da cobertura vegetal nas áreas de pastagem contribuem para o aumento da erosão hídrica, que afeta a retenção de água e a qualidade geral do solo.

Para Falcão et al. (2020), o manejo do solo influencia diretamente a densidade do solo. Nesse estudo, os sistemas de preparo convencional e solo exposto resultaram em maior compactação do solo, com densidade mais elevada. Em contrapartida, o sistema de pastagem permanente e o sistema plantio direto apresentaram menores densidades do solo, indicando que esses sistemas são mais eficazes em manter a estrutura física do solo, promovendo maior porosidade e melhor qualidade física.

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. (2007) observou-se que a braquiária obteve boa capacidade de geração de matéria orgânica e melhoria na física do solo, sendo, portanto, uma alternativa de manejo conservacionista do solo.

A porosidade é um indicador de avaliação da qualidade do solo que está relacionada com sua textura e estrutura, tendo uma grande influência sobre a drenagem, a retenção do perfil e a aeração. O conhecimento da porosidade total é importante para se entender o movimento e a retenção de água, ar e solutos no solo, entre outros aspectos (ALMEIDA et al, 2017a).

A porosidade está dividida em diferentes classes de poros. Os macroporos são responsáveis pela aeração e infiltração de água e os microporos são responsáveis por reter e armazenar água no solo, para posterior uso pelas plantas. Para um desenvolvimento adequado das plantas é essencial um equilíbrio entre macro e microporos (TAVARES FILHO et al., 2010).

As mudanças no uso do solo podem influenciar no tanto no armazenamento de carbono orgânico quanto na agregação do solo e o teor desse efeito é estritamente relacionado ao manejo e textura do solo (QIU et al., 2012). A agregação do solo impacta os aspectos essenciais do solo, aeração, capacidade de retenção de água, 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 (RANGEL-VASCONCELOS et al., 2015).

Liu et al. (2016) observaram que macroagregados com alta porosidade promovem um maior acúmulo de carbono orgânico no solo e uma maior atividade enzimática microbiana. Para manter o carbono orgânico no solo são necessárias algumas práticas como evitar o desmatamento, revolvimento do solo, aração e gradagem contínuas devido à emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Isso devido à susceptibilidade e à oxidação microbiana que o carbono possui, principalmente em solos descobertos (BARRETO et al., 2008).

A textura do solo é uma propriedade empregada na classificação pedogenética e tem a capacidade de influenciar outros fatores tais como a densidade, porosidade e condutividade hidráulica saturada. Entretanto, não é um indicador recomendado por não sofrer alterações pelo manejo, inviabilizando comparações (CHERUBIN et al., 2016).

Todavia, conhecer a textura do solo é extremamente importante pela influência que exerce em outros atributos do solo que possuem relação direta com sua estrutura, como densidade, porosidade e capacidade de resistência a determinada prática agrícola (DE MARIA et al., 1999).

Neste viés, conhecer a textura e principalmente o teor de argila do solo se faz importante quando se pensa em indicadores de qualidade física do solo. A argila é definida mais comumente como um material natural, de granulação fina, que apresenta plasticidade quando umedecida e apresenta composição química principalmente de silicatos hidratado de alumínio, ferro e magnésio, denominados argilominerais (SANTOS, 1992).

A composição mineral das argilas e dos cátions apresenta em suas camadas tetraédricas, octaédricas e nas sobreposições dessas camadas permitem classificá-las em dois tipos principais: argilas 1:1 (tetraédrica/octaédrica) e argilas 2:1 (tetraédrica/octaédrica/tetraédrica). Caulinita é um exemplo de argila 1:1, já a esmectita e vermiculita são exemplos de argilas 2:1. Essas argilas possuem cargas que variam conforme sua composição mineral e podem ser influenciadas pelo pH e por substituições isomórficas, como a troca de átomos de Si<sup>4+</sup> por Al<sup>3+</sup> e de Al<sup>3+</sup> por Mg<sup>2+</sup>, essas substituições isomórficas são mais significativas em argilas silicatadas do tipo 2:1, mas também podem ocorrer em argilas do tipo 1:1. Essas substituições geram cargas negativas nas camadas das argilas, o que contribui para propriedades como a capacidade de troca catiônica (NEUMANN et al., 2000).

A argila dispersa em água (ADA), não é considerada um indicador de qualidade, mas exerce influência em outros indicadores físicos, podendo acarretar em redução da porosidade e aumento da densidade, entre outros indicadores que podem ser afetados. A dispersão da argila está diretamente relacionada ao comportamento da dupla camada difusa, aos teores de argila no solo, à interação entre minerais e matéria orgânica, aos níveis de cátions e à presença de microrganismos (ASSOULINE; TAVARES-FILHO; TESSIER, 1997). A interação entre minerais, matéria orgânica e cátions influencia a geração de cargas, favorecendo uma maior ou menor dispersão dos colóides. No entanto, o acúmulo excessivo de cargas negativas ou positivas na argila pode ser prejudicial, levando à sua dispersão.

O efeito dispersivo prejudica a estrutura do solo, afetando a estabilidade dos agregados e os espaços porosos, o que dificulta a infiltração de água. No entanto, são necessárias pesquisas para caracterizar os fatores que levam à dispersão da argila, que possuem agregação primária em pequenos grânulos, naturalmente obtidos e resistentes, e que não seguem a hierarquização dos agregados (TISDALL e OADES, 1982).

### 3.7.2 Indicadores de Qualidade Química do Solo

Quando se trata dos indicadores químicos de qualidade do solo, o pH, CTC, matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes são fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, auxiliando na sustentabilidade dos biomas através da ciclagem de nutrientes. Esses parâmetros estão diretamente ligados ao rendimento das culturas, permitindo ações de correção do solo por meio de adubações e calagens (CARDOSO et al., 2011).

O pH do solo é notadamente um parâmetro de grande importância, principalmente solos de regiões tropicais, uma vez que grande parte dos solos brasileiros apresentam problemas de acidez, e nesses casos, a presença de alumínio em quantidades tóxicas se torna um impeditivo para o desenvolvimento das culturas. Diante deste problema, o sistema radicular das plantas se desenvolve pouco, limitando a absorção de água e nutriente (MELLONI et al., 2008).

O pH indica as condições químicas gerais do solo. Solos com alta acidez (baixo pH) geralmente apresentam: deficiência em bases como cálcio e magnésio; alto teor

de alumínio tóxico; excesso de manganês; forte retenção de fósforo nos colóides do solo e deficiência de alguns micronutrientes como molibdênio e cloro (LOPES; GUILHERME, 2007).

Assim, o pH exerce grande influência na disponibilidade de nutrientes para as plantas, solubilidade de elementos que podem ter efeitos tóxicos, atividade microbiana, favorecimento ou não de doenças, habilidade de competição entre diferentes espécies de plantas e condições físicas do solo (NOVAES et al., 2007).

Como o pH influencia na disponibilidade de nutrientes, ele exercerá influência também na capacidade de troca catiônica (CTC) e na saturação por bases (V%) do solo. A CTC é a quantidade de cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) que um material pode reter. A maior parte dos nutrientes utilizados pelas plantas e microrganismos são absorvidos na sua forma iônica, desta forma, descrevem a fertilidade do solo (LEE et al., 2010; GAI et al., 2014).

O potencial de troca iônica dos solos representa a capacidade de liberar diversos nutrientes, o que ajuda a manter a fertilidade por um longo período e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos ao solo através da aplicação de fertilizantes, corretivos e resíduos orgânicos (RONQUIM, 2010).

Sendo influenciada também pela acidez e variando de acordo com a origem da formação do solo (LOZADA, 2015), a saturação por bases é a razão entre o total de bases e o teor encontrado na amostra em relação percentual com a CTC pH 7,0, ou CTC total (ASMAR JÚNIOR, 2019). De acordo com Lepsch (2011), os solos de alta saturação são chamados eutróficos e apresentam V% >50% e são considerados os mais férteis, enquanto que os de baixa são chamados de distróficos, considerados como menos férteis, possuindo V% <50%.

A saturação por bases é um dos métodos mais utilizados para a correção de acidez do solo, através da determinação da necessidade de calagem. Na agricultura, a calagem pode contribuir no aumento da produtividade, na qualidade e no estabelecimento dos plantios florestais (CARLOS et al. 2014), e quando se altera um ambiente onde não houve ação antrópica para ambientes de produção agropecuária, além da modificação dos indicadores químicos já mencionados, os teores de matéria e carbono orgânico são alterados.

A alteração de ambientes naturais para sistemas agrícolas intensivos frequentemente reduz a matéria orgânica do solo (NANZER et al., 2019). Sistemas convencionais de preparo do solo, que envolvem revolvimento constante,

intensificam a erosão e diminuem a fertilidade do solo devido à perda de matéria orgânica (ARAÚJO et al., 2011; MACHADO et al., 2014; CARDOSO et al., 2015; SANTOS et al., 2019).

A textura do solo influencia na retenção do carbono orgânico, sendo solos argilosos mais favoráveis à estabilização do húmus (EBELING et al., 2011; DICK et al., 2005). A mineralogia do solo também desempenha um papel importante na agregação e na estabilidade do carbono orgânico, com diferentes minerais de argila possuindo distintas capacidades de formação de agregados (CHOROVER et al., 2004). No estudo de Moraes et al. (2023), os autores concluíram que o uso da crotalária como planta de cobertura em solos arenosos é vantajoso para melhorar o teor de carbono orgânico, a fertilidade do solo e aumentar a produtividade da cana-de-açúcar.

A substituição de vegetação nativa por sistemas agrícolas modifica a quantidade e a qualidade do carbono do solo, com a adição de resíduos vegetais protegendo os agregados da superfície contra degradação (CALEGARI et al., 2006; SALTON et al., 2008; COUTINHO et al., 2010).

Em áreas degradadas, especialmente aquelas convertidas em pastagens, é essencial estudar como essas mudanças afetam a dinâmica da matéria orgânica e as propriedades do solo (FERREIRA et al., 2014). Solos de pastagem degradada apresentam menores estoques de carbono em comparação com vegetação nativa, enquanto pastagens bem manejadas podem melhorar a qualidade do solo (PEGORARO et al., 2018; FERREIRA et al., 2014).

Manter o solo coberto com resíduos vegetais é fundamental para a manutenção da microbiota do solo e o acúmulo de carbono orgânico. A aplicação de adubo orgânico melhora a qualidade dos agregados do solo e sua capacidade de absorção de água (RIBON et al., 2014). A estrutura do solo influencia na atividade enzimática, sendo os agregados do solo protetores do carbono orgânico e facilitadores das atividades microbianas (RUAMPS et al., 2011).

No estudo de Troian et al. (2020) avaliando os diferentes sistemas de manejo (pastagem, eucalipto, lavoura e mata) encontraram os seguintes resultados para o carbono orgânico total: os maiores valores de carbono foram observados na área de mata, variando de 13,75 a 21,95 g kg<sup>-1</sup>, devido ao constante aporte de resíduos vegetais e à ausência de revolvimento; a pastagem variou de 7,07 a 8,76 g kg<sup>-1</sup>, sendo inferior ao da área de mata; a área com eucalipto apresentou valores de 6,96

a  $7,72 \text{ g kg}^{-1}$ , indicando baixos teores de carbono devido ao manejo inadequado; a lavoura teve teores de carbono variando entre  $7,47$  e  $9,09 \text{ g kg}^{-1}$ , refletindo a pouca eficiência do manejo em acumular carbono no solo.

Segundo Silva et al. (2012), observaram uma redução nos valores de carbono orgânico total e nas propriedades biológicas do solo nas áreas agrícolas quando comparados aos das áreas de pasto e florestais. No estudo de Falcão et al. (2020), o tratamento com solo exposto apresentou os menores valores de carbono orgânico total, enquanto o sistema de pastagem permanente e área com plantio direto apresentaram o maior valor. Os autores concluíram que sistemas de manejo que reduzem o revolvimento do solo e mantêm a cobertura vegetal, como o plantio direto e a pastagem permanente, são essenciais para a preservação da qualidade do solo no Cerrado. Essas práticas não apenas aumentam o estoque de carbono, mas também melhoram a estrutura do solo, promovendo a sustentabilidade a longo prazo.

No estudo de Vezzani e Mielniczuk et al. (2011) avaliando o estoque de carbono em diferentes práticas de manejo agrícola encontraram resultados para o estoque de carbono no campo nativo de  $20,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  na camada superficial, enquanto no sistema lavoura, esse valor foi reduzido para  $11,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  devido à degradação do solo.

O sistema plantio direto com consórcios de culturas, (*Avena strigosa* + *Vicia sativa* e milho + caupi), conseguiu recuperar os estoques de carbono próximos ao nível do campo nativo, demonstrando que práticas agrícolas conservacionistas, sem revolvimento do solo, podem restaurar a qualidade química do solo. A pastagem perene também obteve altos índices de agregação do solo ( $74,1\%$ ), mas com um estoque de carbono inferior ao dos sistemas consorciados, destacando o papel das raízes densas na recuperação da estrutura do solo, mas com menor acúmulo de carbono.

A implementação de práticas de manejo adequadas, como o acréscimo de palhada e o cultivo consorciado, é essencial para promover a melhoria dos indicadores de qualidade do solo e garantir a sustentabilidade dos sistemas agropecuários (BORGHI et al., 2007).

Esses diversos atributos químicos do solo são utilizados para avaliar a qualidade do solo, pois determinam a capacidade do solo de fornecer nutrientes essenciais para o crescimento das plantas e sustentação dos ecossistemas

agrícolas. A compreensão e o manejo adequado desses atributos químicos são fundamentais para promover a saúde do solo e a produtividade agrícola.

### 3.7.3 Indicadores de Qualidade Biológica do Solo

De acordo com Pereira et al. (2024) os principais indicadores biológicos avaliar a qualidade do solo agrícola são:

a) biomassa microbiana do solo (BMS): representa a parte viva e ativa do solo e é composta por microrganismos como bactérias, fungos e outros organismos. A BMS é sensível a mudanças no uso e manejo do solo, refletindo rapidamente alterações na matéria orgânica e na saúde do solo;

b) respiração basal do solo (RBS): mede a quantidade de CO<sub>2</sub> liberado durante a decomposição da matéria orgânica. A RBS é um indicador importante da atividade biológica no solo, sendo afetada por práticas de manejo e pelas condições ambientais;

c) atividade enzimática: inclui enzimas como a fosfatase ácida, β-glicosidase e arilsulfatase, responsáveis pela ciclagem de nutrientes, como fósforo, carbono e enxofre. A atividade enzimática é uma medida sensível das funções biológicas do solo, que respondem rapidamente às mudanças no manejo;

d) quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>): indica o nível de estresse microbiano e eficiência da biomassa microbiana no uso de energia. Valores mais altos de qCO<sub>2</sub> podem indicar que os microrganismos estão utilizando mais energia para manutenção do que para crescimento, o que pode ser um sinal de estresse ou degradação do solo.

Sendo assim, os indicadores biológicos de qualidade são extremamente importantes para o monitoramento sistemático e contínuo do solo. Sena et al. (2000), sugeriram vários indicadores biológicos e bioquímicos que podem ser utilizados para a avaliação da qualidade do solo. Dentre os indicadores biológicos, a biomassa microbiana é um importante parâmetro de ciclagem de nutrientes nos ecossistemas, pois representa a porção da matéria orgânica do solo que é mais rapidamente decomposta.

A biomassa microbiana é o componente vivo da matéria orgânica do solo, constituída por bactérias, fungos, actinomicetos e protozoários, excluindo-se a macrofauna e as raízes das plantas (RANGEL-VASCONCELOS et al., 2015). É um

dos componentes que controla a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica e até mesmo transformações de nutrientes minerais (ALMEIDA et al., 2017b). Os microrganismos atuam nos processos de decomposição e síntese da matéria orgânica do solo, formação e estabilização de agregados, biorremediação de áreas afetadas por poluentes e metais pesados e, no controle e supressão biológica de fitopatógenos (REIS JÚNIOR e MENDES, 2007).

Por todas essas razões, a biomassa microbiana é vital para manter a qualidade do solo e a produtividade das plantas. Uma das principais vantagens do uso do índice de carbono da biomassa microbiana e da atividade enzimática, como bioindicadores de qualidade de solo, é a sensibilidade dos parâmetros microbiológicos para detectar os efeitos de diferentes manejos do solo, em estágio anterior ao das alterações dos teores de matéria orgânica (SILVA et al., 2009).

O nitrogênio da biomassa microbiana indica a quantidade de nitrogênio presente na biomassa microbiana, refletindo a produtividade microbiana e a capacidade de ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo e saúde do ecossistema. Esse índice é altamente sensível a mudanças nas práticas de manejo do solo, como rotação de culturas, adubação nitrogenada e aplicação de resíduos orgânicos. Essas mudanças refletem a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana no solo (FAUCI e DICK, 2015).

O nitrogênio na biomassa microbiana desempenha um papel crucial na mineralização do nitrogênio, tornando um indicador chave da disponibilidade desse nutriente para as plantas e essencial para a produtividade agrícola (LIU et al., 2010). Solos com níveis elevados de nitrogênio na biomassa microbiana tendem a ter melhor estrutura, maior capacidade de retenção de água e nutrientes, e maior resistência à erosão e degradação (CHEN et al., 2021).

O carbono e nitrogênio da biomassa microbiana estão correlacionados e essas inter-relações ajudam a entender a dinâmica do solo e a eficácia das práticas de manejo na manutenção da saúde do solo (OYEDELE et al., 2015). Tanto o carbono quanto o nitrogênio da biomassa microbiana são indicadores importantes para a qualidade biológica do solo, refletindo a atividade microbiana, a ciclagem de nutrientes e a saúde geral do solo. Monitorar esses índices pode fornecer compreensões fundamentais para práticas de manejo sustentável que promovam a fertilidade do solo e a produtividade agrícola.

Igualmente importante indicador biológico, a respiração basal reflete a velocidade de decomposição de um resíduo orgânico adicionado ao solo. Quando a atividade microbiana é alta ocorre maior decomposição e, conseqüentemente, liberação de nutrientes para as plantas. Porém, também pode significar perdas de carbono do solo, em longo prazo (ZHENG, 2006). A respiração é um dos mais antigos parâmetros para quantificar a atividade microbiana do solo (MOREIRA e SIQUEIRA, 2002).

Segundo Parkin et al. (1996), respiração microbiana refere-se à produção ou consumo de CO<sub>2</sub> por microrganismos como bactérias, fungos, algas e protozoários durante processos metabólicos. Ainda segundo esses autores, a respiração do solo pode indicar dois aspectos opostos na relação entre a matéria orgânica e a qualidade do solo, sendo que a longo prazo, a perda de matéria orgânica pode ser vista como um resultado negativo da respiração do solo, porém, no curto prazo, ela representa a transformação da matéria orgânica e a liberação de nutrientes.

Desde a perspectiva agrícola, é fundamental enfatizar a importância de obter o maior conhecimento possível sobre a respiração microbiana em vários sistemas produtivos. D'Andréa et al. (2002) investigaram a respiração microbiana em diferentes áreas: cerrado nativo, pastagem, plantio direto, plantio direto com histórico de gradagem superficial, plantio convencional de longa duração e plantio convencional recente após pastagem, todas situadas em um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa. Os resultados mostraram que a respiração microbiana foi mais intensa nas áreas de plantio direto, provavelmente devido ao maior aporte de matéria orgânica associado a esse método de manejo.

O estudo de Novak et al. (2022) comparou os efeitos de diferentes manejos e períodos de restauração ecológica na biomassa e atividade microbiana do solo, fornecendo descobertas sobre a recuperação da qualidade microbiológica do solo ao longo do tempo. A análise de agrupamento mostrou que a área de cultivo de cana-de-açúcar diferiu das áreas de restauração ecológica e da área de vegetação nativa, indicando que o manejo intensivo da cana impacta significativamente os atributos microbiológicos do solo.

Esses resultados indicam que o processo de restauração ecológica melhora a qualidade do solo ao longo do tempo, principalmente em áreas que recebem intervenções mais intensivas. Por outro lado, o cultivo contínuo de cana-de-açúcar

tende a manter características microbiológicas desfavoráveis, impactando negativamente a sustentabilidade do solo.

Lazzaretti et al. (2019) analisaram diferentes sistemas agrícolas e florestal na qualidade química e biológica do solo. Os resultados indicaram que a mata nativa apresentou a maior respiração basal do solo ( $22,43 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo.dia}^{-1}$ ), seguido pela lavoura de soja (plantio direto) ( $20,04 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo.dia}^{-1}$ ) e o menor valor para o sistema com eucalipto ( $8,37 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo.dia}^{-1}$ ). Para o carbono da biomassa microbiana a mata nativa apresentou o maior valor ( $410,57 \text{ mg Cmic kg}^{-1} \text{ solo}$ ), seguido pela lavoura de soja ( $264,78 \text{ mg Cmic. kg}^{-1} \text{ solo}$ ) e o menor valor encontrado para sistema com videira ( $200,93 \text{ mg Cmic. kg}^{-1} \text{ solo}$ ).

Para o  $q\text{CO}_2$ , o menor valor foi encontrado na mata nativa, indicando maior estabilidade ( $0,053 \text{ mg C-CO}_2.\text{g}^{-1} \text{ BMS-C.h}^{-1}$ ) e o sistema de lavoura de fumo o maior valor, indicando maior estresse ( $0,079 \text{ mg C-CO}_2.\text{g}^{-1} \text{ BMS-C.h}^{-1}$ ). O quociente microbiano não apresentou diferença significativa entre os sistemas e a respiração induzida por substrato foi maior na mata nativa ( $687,56 \text{ mg Cmic kg de solo seco}$ ) e menor no sistema com eucalipto ( $262,42 \text{ mg Cmic kg de solo seco}$ ).

Esses resultados indicaram que a mata nativa apresentou os maiores valores para quase todos os indicadores biológicos, sugerindo uma maior qualidade biológica e estabilidade. Já os sistemas de cultivo, especialmente o eucalipto e a videira, mostraram valores menores, indicando maior degradação biológica e estresse do solo.

A atividade biológica é expressamente concentrada nas camadas superficiais do solo, principalmente no horizonte A. Nesta camada, estão presentes os microrganismos que realizam diversas funções essenciais para o funcionamento do solo (KENNEDY e SMITH, 1995). Os microrganismos do solo exercem diversas funções, entre elas, decompondo a matéria orgânica, liberam nutrientes para as plantas, degradam substâncias tóxicas, formam associações simbióticas com raízes de plantas, atuam no controle biológico de patógenos, influenciam na solubilização de minerais e contribuem para estruturação e agregação do solo (KENNEDY e SMITH, 1995).

A microbiota do solo é um indicativo de mudança na qualidade do solo, sendo que os microrganismos possuem a capacidade de dar respostas rápidas a mudanças na qualidade do solo. A atividade microbiana pode preceder alterações nas propriedades químicas e físicas, refletindo em um alerta para a melhoria ou

degradação do solo (ARAÚJO et al., 2007). Todavia, os atributos microbiológicos são mais sensíveis a alterações quando o solo está sujeito às diferentes formas de manejo, podendo estes serem considerados melhores indicadores de qualidade ambiental (ARAÚJO et al., 2007).

As mudanças no uso do solo associadas ao manejo proporcionam alterações nas propriedades biológicas do solo. Manejos convencionais intensivos proporcionam a redução nos teores de carbono microbiano, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo, provocando conseqüentemente, redução na qualidade do solo. Os atributos biológicos do solo são fundamentais para avaliar e garantir a qualidade do solo, proporcionando informações essenciais para práticas de manejo sustentável que promovam a saúde do solo. Esses indicadores fornecem uma visão abrangente sobre a saúde biológica do solo e sua capacidade de sustentar a produção agrícola de forma sustentável (PEREIRA et al., 2024).

### 3.8 QUALIDADE VS. MANEJO DO SOLO

Como já observado, os indicadores de qualidade do solo são essenciais para avaliar o impacto dos diferentes tipos de manejo do solo em suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Os indicadores físicos do solo são essenciais para entender como o solo suporta as plantas e a sua capacidade de resistir à compactação. Indicadores químicos são críticos para a avaliação da fertilidade do solo. Os indicadores biológicos são altamente sensíveis às práticas de manejo do solo.

A manutenção e melhoria da qualidade do solo são fatores essenciais para a sustentabilidade agrícola e a preservação dos ecossistemas. Neste contexto, práticas de manejo sustentável vêm sendo amplamente estudadas como ferramentas importantes para promover a saúde do solo, garantindo a sua funcionalidade a longo dos anos. As práticas como o plantio direto, rotação de culturas e a adubação verde influenciam diretamente os indicadores de qualidade do solo. De acordo com Stellacci et al. (2021), a rotação de culturas combinada com o não revolvimento do solo levou a uma melhoria significativa nos indicadores de qualidade do solo, como o teor de carbono orgânico total e a capacidade de retenção de água.

Os manejos sustentáveis visam mitigar esses impactos negativos, promovendo a regeneração e a conservação dos solos. Além dos impactos diretos nos indicadores de qualidade do solo, os manejos sustentáveis aumentam a resiliência do solo frente a mudanças climáticas e eventos extremos (LAL, 2004). A maior porosidade e retenção de água associadas a essas práticas tornam os solos mais preparados para suportar períodos de seca ou chuvas intensas, diminuindo a erosão e a perda de nutrientes. Práticas como a integração lavoura-pecuária-floresta também aumentam a resiliência do solo ao promover maior biodiversidade e reciclagem de nutrientes.

O manejo sustentável, como o plantio direto e a rotação de culturas, tem mostrado melhorar a agregação do solo e reduzir a compactação, promovendo maior retenção de água e resistência à erosão (MOEBIUS-CLUNE et al., 2007). O uso de fertilizantes orgânicos e a adubação verde, aumentam os teores de matéria orgânica no solo e promovem uma maior capacidade de troca de cátions, o que melhora a retenção de nutrientes e reduz a lixiviação (LI et al., 2013). A utilização de compostagem e resíduos vegetais contribui para o aumento da biomassa microbiana e para a melhoria da capacidade do solo em decompor matéria orgânica, favorecendo o ciclo de nutrientes (BHADURI et al., 2017).

Práticas sustentáveis de manejo do solo, como o plantio direto, a rotação de culturas, o uso de adubos orgânicos e a integração lavoura-pecuária-floresta, são ferramentas essenciais para a promoção da qualidade do solo. O plantio direto, que envolve a mínima perturbação do solo e a manutenção de resíduos vegetais na superfície, tem mostrado aumentar significativamente a estabilidade dos agregados do solo, reduzindo a erosão e melhorando a capacidade de infiltração de água (STELLACCI et al., 2021).

A rotação de culturas aumenta a diversidade de plantas e microrganismos no solo, o que melhora a estrutura do solo e promove o equilíbrio de nutrientes. Estudos apontam que a rotação com leguminosas, por exemplo, contribui para a fixação biológica de nitrogênio e reduz a necessidade de fertilizantes sintéticos (DORAN e ZEISS, 2000). A aplicação de fertilizantes orgânicos, como o esterco e compostos vegetais, aumenta os níveis de matéria orgânica e melhora a fertilidade do solo. Isso é fundamental para a retenção de nutrientes e a promoção da atividade microbiana (LI et al., 2013).

Como já relatado, os manejos agrícolas têm impactos diretos e profundos sobre a qualidade do solo, influenciando suas características físicas, químicas e biológicas. Enquanto práticas convencionais podem levar à degradação do solo, os manejos sustentáveis oferecem uma abordagem regenerativa, garantindo a sustentabilidade da produção agrícola. A adoção de práticas como o plantio direto, rotação de culturas e adubação orgânica é fundamental para reverter os impactos negativos da agricultura intensiva e promover solos mais saudáveis e produtivos.

### 3.9 IMPACTOS DO MANEJO INADEQUADO NA QUALIDADE DO SOLO

As práticas de manejo agrícola, sejam sustentáveis ou convencionais, vão apresentar um impacto significativo nos indicadores físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo. Mas nem todo manejo adotado pode melhorar as propriedades do solo, nos casos de manejo mal aplicado pode acarretar a degradação do solo e influenciar negativamente o potencial produtivo das culturas. Os sistemas agrícolas convencionais, que muitas vezes utilizam o preparo intensivo do solo, monoculturas e fertilizantes sintéticos, têm sido associados à degradação da qualidade do solo.

Um dos impactos mais comuns de práticas de manejo inadequadas, como o uso de maquinário pesado e o preparo intensivo do solo, é a compactação. A compactação reduz significativamente a porosidade do solo, diminuindo a infiltração de água e a aeração, o que prejudica o desenvolvimento das raízes e a disponibilidade de água para as plantas. Peixoto et al. (2020) identificaram que solos compactados têm uma menor capacidade de retenção de água e são mais suscetíveis à erosão, além de comprometerem a biodiversidade microbiana devido à falta de oxigênio no solo. Além disso, podem causar erosão e perda de nutrientes.

A erosão do solo é um problema sério que resulta da remoção da camada superficial do solo, rica em matéria orgânica e nutrientes. Manejos inadequados, como a ausência de cobertura vegetal e o preparo intensivo, expõem o solo à erosão, especialmente em áreas de declive. A erosão reduz a profundidade do solo arável, o que limita o desenvolvimento das raízes e a disponibilidade de nutrientes e água. Schindelbeck et al. (2008) destacam que a perda contínua de solo superficial pela erosão é um dos maiores fatores que levam à degradação permanente da qualidade do solo, reduzindo a fertilidade e a produtividade.

O manejo inadequado pode também causar a diminuição da matéria orgânica. O uso extensivo de fertilizantes sintéticos e a monocultura podem esgotar a matéria orgânica do solo, o que afeta negativamente sua estrutura, capacidade de retenção de água e capacidade de fornecer nutrientes.

A matéria orgânica é fundamental para a saúde do solo, pois atua como uma reserva de nutrientes e melhora a estrutura do solo, aumentando sua capacidade de resistir à erosão e de reter água e nutrientes. Li et al. (2013) mostraram que a ausência de práticas de reposição de matéria orgânica, como a adubação verde e o uso de compostagem, leva à perda significativa de carbono orgânico no solo, prejudicando a fertilidade do solo.

Outro fator causado pelo manejo incorreto é a degradação biológica, ocasionando a redução da atividade microbiana e da biodiversidade do solo. Práticas como o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes químicos reduzem a população de microrganismos benéficos, afetando processos vitais como a decomposição de matéria orgânica e o ciclo de nutrientes. Bhaduri et al. (2017) ressaltaram que a aplicação indiscriminada de fertilizantes e pesticidas químicos pode diminuir drasticamente a atividade da biomassa microbiana, impactando negativamente a regeneração de nutrientes e a fertilidade do solo.

Outro problema é a poluição do solo, particularmente por meio da aplicação excessiva de fertilizantes e pesticidas químicos. Esses insumos, quando aplicados em excesso, podem contaminar os recursos hídricos e acumular-se no solo, levando à salinização e ao acúmulo de metais pesados, que prejudicam a vida do solo e a saúde das plantas. Stellacci et al. (2021) identificaram que o uso prolongado de fertilizantes químicos sem práticas de mitigação, como a rotação de culturas e a adubação orgânica, pode aumentar a salinização e reduzir a capacidade produtiva do solo.

Além disso, o manejo impróprio do solo também pode causar a redução da capacidade de resiliência, ou seja, a capacidade do solo de se recuperar de distúrbios, como secas, enchentes e mudanças no uso da terra, depende de sua estrutura, fertilidade e biodiversidade. O manejo inadequado diminui essa resiliência, tornando o solo mais vulnerável a degradações futuras. A compactação, perda de matéria orgânica e redução da biodiversidade tornam o solo menos capaz de se regenerar e suportar a produção a longo prazo, como apontado por Moebius-Clune

et al. (2007), que observaram que solos manejados de forma inadequada têm menor resiliência a mudanças climáticas e a eventos extremos.

Os impactos negativos do manejo inadequado do solo são extensos, comprometendo a sua capacidade de sustentar a produção agrícola e serviços ecossistêmicos do solo. Práticas como o preparo intensivo do solo, monoculturas, uso indiscriminado de fertilizantes químicos e ausência de práticas conservacionistas resultam em compactação, erosão, perda de matéria orgânica, degradação biológica e poluição do solo. Para mitigar esses impactos e garantir a sustentabilidade do solo, é fundamental adotar práticas de manejo corretas que promovam a conservação e regeneração do solo.

### 3.10 ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA MELHORAR A QUALIDADE DO SOLO

Para mitigar os impactos negativos do manejo inadequado e promover a qualidade e sustentabilidade do solo, diversas estratégias de manejo sustentável têm sido amplamente estudadas e aplicadas. Essas estratégias têm como objetivo melhorar os indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, garantindo a sua capacidade de sustentar a produção agrícola. A seguir, estão algumas das principais práticas de manejo que contribuem para a melhoria da qualidade do solo.

#### 3.10.1 Plantio Direto

O plantio direto é uma técnica de manejo conservacionista que envolve a mínima perturbação do solo, mantendo os resíduos vegetais na superfície, o que contribui para a melhoria da estrutura do solo e para a redução da erosão. Essa prática aumenta a capacidade de retenção de água e melhora a infiltração, reduzindo a compactação do solo.

Moebius-Clune et al. (2007) e Caires (2013) destacam que o plantio direto melhora a estabilidade dos agregados do solo, o que contribui diretamente para a redução da erosão e para a melhoria da capacidade de armazenamento de água. Além disso, o plantio direto promove o aumento da matéria orgânica, essencial para a fertilidade do solo e para o aumento da atividade microbiana (SÁ, 1999). Essa técnica já é amplamente utilizada em regiões de cultivo de grãos no Brasil, e tem

demonstrado ser eficaz na promoção da sustentabilidade agrícola e na preservação dos recursos naturais.

### 3.10.2 Rotação de Culturas

A rotação de culturas é uma prática que envolve a alternância de diferentes tipos de plantas cultivadas em uma mesma área ao longo do tempo. A diversidade de espécies cultivadas favorece o equilíbrio de nutrientes no solo, além de interromper o ciclo de pragas e doenças que muitas vezes afetam monoculturas (ZOHRY e OUDA, 2018).

A rotação de culturas aumenta os teores de matéria orgânica e melhora a fertilidade do solo, promovendo uma maior diversidade microbiana e melhorando a estrutura do solo (STELLACCI et al., 2021). A inclusão de leguminosas na rotação de culturas, por exemplo, contribui para a fixação biológica de nitrogênio, o que reduz a necessidade de fertilizantes químicos e promove um equilíbrio mais sustentável no manejo de nutrientes do solo.

### 3.10.3 Sistemas consorciados

Os sistemas consorciados que envolvem gramíneas, principalmente do gênero *Urochloa*, tem um papel fundamental quando se pensa na melhoria dos atributos do solo, proporcionando benefícios tanto físicos, quanto químicos e biológicos. Um dos motivos que geram essas melhorias, se devem ao sistema radicular denso dessas gramíneas, que consegue explorar o solo diminuindo sua densidade e propiciando um ambiente mais adequado para a absorção e retenção de água e nutrientes.

A presença da *Urochloa* contribui para manutenção da umidade do solo, reduzindo erosão e melhorando a estrutura do perfil do solo. Além disso, a biomassa gerada por essas gramíneas atua na ciclagem de nutrientes, contribuindo para aumento nos teores de matéria orgânica e favorecendo a atividade microbiana, fatores fundamentais para a fertilidade e sustentabilidade do solo a longo prazo.

### 3.11 DESAFIOS E PERSPECTIVAS

A segurança alimentar é uma das maiores preocupações globais, especialmente à medida que a população mundial continua a crescer. Com a previsão de que a população mundial alcance cerca de 9,7 bilhões de pessoas até 2050 (EBENSO et al., 2022), o desafio de fornecer alimentos suficientes e nutritivos é imenso. Para atender a essa demanda, a produção agrícola precisará aumentar em cerca de 70% nos próximos 30 anos, de acordo com a FAO (GRIMBLATT, 2021).

No Brasil, a expansão agrícola deve ser acompanhada de uma gestão eficiente dos solos e da água para garantir a segurança alimentar sem comprometer os recursos naturais (MERTEN e MINELLA, 2013; AYALA et al., 2016; STABILE et al., 2020). Além de aumentar a segurança alimentar, é necessário sequestrar o carbono no solo. Esse procedimento tem o potencial de compensar as emissões de combustíveis fósseis em 0,4 a 1,2 gigatoneladas de carbono por ano, ou 5 a 15% das emissões globais de combustíveis fósseis (LAL, 2004).

Ao mesmo tempo, as mudanças climáticas estão alterando os padrões de precipitação, aumentando a ocorrência de eventos climáticos extremos e afetando a temperatura global, o que, por sua vez, tem grandes implicações para a produção agrícola. No Brasil, a produção agrícola pode ser severamente impactada por mudanças no regime hídrico e na temperatura, prejudicando culturas sensíveis. A redução da disponibilidade de água será um dos maiores desafios da agricultura brasileira nas próximas décadas, o que exigirá o desenvolvimento de sistemas de irrigação mais eficientes e práticas agrícolas que aumentem a resiliência dos cultivos (OLIVEIRA SILVA et al., 2020).

A expansão agrícola sem planejamento adequado pode levar à perda de biodiversidade, o que compromete não apenas os ecossistemas, que são vitais para a produção agrícola (DE ARAÚJO, et al. 2019). A conservação da biodiversidade está intimamente ligada à proteção de áreas naturais.

Portanto, a sustentabilidade na agricultura envolve a busca por sistemas de produção que equilibrem a alta produtividade com a conservação ambiental. Práticas de manejo como o plantio direto e a rotação de culturas são estratégias que contribuem para a qualidade do solo e reduzem a dependência de insumos químicos (REICOSKY, 2020).

Sistemas de produção sustentáveis que conciliem a alta produtividade com a conservação ambiental serão essenciais para garantir que possamos alimentar uma população crescente sem esgotar os recursos naturais. O Brasil, com sua imensa biodiversidade, tem um papel crítico nesse cenário global e deve liderar o caminho na implementação de práticas agrícolas que promovam tanto a segurança alimentar quanto a sustentabilidade (FUENTES-LLANILLO et al., 2021; FREITAS e LANDERS, 2014).

### 3.12 CONCLUSÃO

Os indicadores físicos, químicos e biológicos destacam a importância de práticas agrícolas favoráveis para preservar e melhorar a qualidade do solo. Práticas como o plantio direto, a rotação de culturas e a adubação verde são eficazes para mitigar os impactos negativos do manejo incorreto. Os impactos de práticas de manejo inadequadas e o uso agrícola intensivo do solo são a compactação, a erosão, a diminuição da matéria orgânica, a degradação biológica, a poluição do solo e a redução da capacidade de resiliência.

O manejo adequado, propondo uma agricultura equilibrada promove a melhoria da biodiversidade, é fundamental para manter a fertilidade do solo, aumentar a matéria orgânica e garantir a resiliência do solo a longo dos cultivos. A adoção dessas práticas contribui não somente para a produtividade agrícola, mas também para a conservação dos recursos naturais, essenciais em um contexto de mudanças climáticas e expansão agrícola.

## 4. ARTIGO B - IMPACTOS DE DIFERENTES TIPOS DE USO E MANEJO NA QUALIDADE, FÍSICA, QUÍMICA E BIOLÓGICA DE UM LATOSSOLO ARGILOSO

### 4.1 RESUMO

A compreensão de como diferentes manejos afetam as características físicas, químicas e biológicas do solo ajuda a desenvolver métodos agrícolas sustentáveis que mantêm a fertilidade e a produtividade do solo. O desenvolvimento de pesquisas é essencial para entender os efeitos do uso do solo e recuperar solos degradados. O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade físico-química e biológica de um Latossolo argiloso, submetido diferentes usos: culturas anuais em plantio direto, culturas anuais com consórcio de *Urochloa ruziziensis*, pastagem e área de floresta. O estudo foi realizado no município de São João do Ivaí-PR. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) nas quatro áreas estudadas e com cinco repetições cada. Foram coletadas amostras em duas profundidades, 0-10 e 10-20 cm. Os atributos químicos avaliados foram: pH, P, K<sup>+</sup>, Al<sup>+3</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, H+Al, CTC, SB, V%, matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT), os atributos biológicos, carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>), quociente microbiano (qMic), e a respiração basal do solo (RBS), e os atributos físicos avaliados foram: argila dispersa em água (ADA), índice de floculação (IF), índice de dispersão (ID) macroporosidade, microporosidade, porosidade total (Pt), densidade do solo (Ds), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados do solo (IEA). As médias foram comparadas pelo teste ANOVA e Tukey (5%), PCA e correlação de Pearson entre as variáveis testadas. A área de floresta apresentou maior CTC, pH, V% e P, e foi também o uso do solo que se destacou com os maiores índices em todos os atributos microbiológicos estudados, com exceção do qCO<sub>2</sub> que foi maior na área de lavoura, sinalizando estresse da microbiota do solo devido ao manejo mais intenso. A área de lavoura se destacou com o maior valor de ADA, ID e menor IF. Os valores de pH e Ca se correlacionaram com a ADA e ID, e a floculação aumentou à medida que os valores de Ca diminuíram. Houve correlação positiva entre os indicadores físicos e biológicos, nas áreas onde o CBM e NBM foram maiores (área de floresta), o solo apresentou melhor distribuição entre macro e microporos, menor valor de ADA e menor densidade. Desta forma, esse trabalho evidenciou que os diferentes usos exercem influência sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

**Palavras-chave:** indicadores de qualidade; manejo do solo; atributos químicos; atividade microbiana; indicadores físicos.

## 4.2 ABSTRACT

Understanding how different management systems affect soil physical, chemical, and biological characteristics helps to develop sustainable agricultural methods that maintain soil fertility and productivity. Research is essential to understand the effects of land use and to recover degraded soils. The objective of this study was to evaluate the physical, chemical, and biological quality of a clayey Latosol, subjected to different uses: annual crops in no-tillage, annual crops with *Urochloa ruziziensis* intercropped, pasture, and forest area. The study was carried out in the municipality of São João do Ivaí-PR. The experimental design used was completely randomized (DIC) in the four studied areas and with five replicates each. Samples were collected at two depths, 0-10 and 10-20 cm. The chemical attributes evaluated were: pH, P, K<sup>+</sup>, Al<sup>+3</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, H+Al, CTC, SB, V%, organic matter (OM), total organic carbon (TOC), biological attributes, microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), metabolic quotient (qCO<sub>2</sub>), microbial quotient (qMic), and soil basal respiration (SBR), and the physical attributes evaluated were: water-dispersible clay (WCD), flocculation index (FI), dispersion index (DI), macroporosity, microporosity, total porosity (Pt), soil density (Sd), weighted mean diameter (WMD), geometric mean diameter (GMD) and soil aggregate stability index (SSI). The means were compared by ANOVA and Tukey test (5%), PCA and Pearson correlation between the variables tested. The forest area presented the highest CEC, pH, V% and P, and it was also the land use that stood out with the highest indices in all microbiological attributes studied, with the exception of qCO<sub>2</sub>, which was higher in the crop area, signaling stress of the soil microbiota due to more intense management. The crop area stood out with the highest ADA and ID values and the lowest IF. The pH and Ca values correlated with ADA and ID, and flocculation increased as Ca values decreased. There was a positive correlation between the physical and biological indicators; in the areas where the CBM and NBM were higher (forest area), the soil presented better distribution between macro and micropores, lower ADA value and lower density. Thus, this study showed that the different uses influence the physical, chemical and biological attributes of the soil.

**Keywords:** quality indicators; soil management; chemical attributes; microbial activity; physical indicators.

### 4.3 INTRODUÇÃO

A qualidade do solo pode ser definida como “a habilidade do solo de operar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para preservar a produtividade biológica, garantir a qualidade ambiental e fomentar a saúde de plantas e animais” (DORAN E PARKIN, 1994; DORAN E PARKIN, 1996). Essa qualidade pode ser avaliada por meio de indicadores, que são atributos mensuráveis e podem ser expressos tanto de forma quantitativa quanto qualitativa (SILVA, 2019).

A avaliação da qualidade do solo visa a compreensão de um sistema complexo e dinâmico, abrangendo a interpretação dos processos produtivos, a restauração de áreas degradadas e a conservação dos recursos naturais (SILVA et al., 2023). Essa mensuração integra os domínios físico, químico e biológico, investigando suas interações e sinergias para compreender e otimizar suas propriedades (SIMON et al., 2022).

Entre os indicadores químicos do solo, o conteúdo de carbono e matéria orgânica (MO), pH, disponibilidade de nutrientes e CTC são propostos com mais frequência para avaliar a sua qualidade (BÜNEMANN et al., 2018). Quanto aos atributos físicos, os principais indicadores utilizados para mensurar a qualidade do solo são a estrutura, agregação, densidade, condutividade hidráulica, resistência a penetração e porosidade (REICHARDT; TIMM, 2012). Da mesma forma, a respiração basal, biomassa microbiana, quociente metabólico e quociente microbiano são os atributos biológicos mais utilizados para estimar a qualidade biológica de um solo (PAREDES JUNIOR, et al., 2015; ZANINETTI, et al., 2016).

Neste viés, a qualidade do solo é um parâmetro essencial para avaliar se o manejo praticado está provocando sua degradação (OLIVEIRA FILHO et al., 2018; SALES et al., 2018; GEISEN et al., 2019). Isto porque, uma vez os ambientes de produção, são o resultado da transformação dos ambientes naturais, e essa modificação na estrutura ecossistêmica associada à retirada da cobertura vegetal, pode comprometer a qualidade física, química e biológica do solo (NANZER, et al., 2019; SANTOS et al., 2019).

Como consequência desse manejo intensivo, a quebra dos agregados afetará os atributos físicos do solo, esse efeito tem como consequência a exposição e perda da MO (BRONICK; LAL, 2005), que culmina na redução dos teores de carbono orgânico do solo nas áreas agrícolas em relação à vegetação nativa (SMITH

et al., 2016; LAL, 2018; NANZER, et al., 2019; SANTOS et al., 2019). Sistemas de manejo que promovam a manutenção da MO, influenciam no aumento do armazenamento do carbono em solos agrícolas, o que pode contribuir para melhorar esses sistemas de produção (OLIVEIRA; FERREIRA, 2015).

Desta forma, quando se pensa na mitigação de impactos ambientais pelas atividades agropecuárias e conservação da qualidade do solo, práticas conservacionistas como o sistema plantio direto, que preconiza a rotação de culturas, a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo juntamente com o seu não revolvimento (LAL, 2015), pode contribuir para a manutenção e até aumento das concentrações de carbono no solo (ALAVAISHA et al., 2019; NIJMEIJER et al., 2019), e ainda, promover uma melhoria nos indicadores físicos do solo e na sustentabilidade a longo prazo (DERPSCH et al., 2010).

Outros sistemas de produção, como as pastagens e utilização de gramíneas consorciadas com culturas anuais, quando bem manejadas, são destaques em estruturação e acúmulo de carbono no solo (SANTOS et al., 2019), pois contribuem para a melhoria dos atributos edáficos do solo, aumentando também seus teores de carbono e suas condições físicas (GAZOLLA et al., 2015).

Portanto, é necessário compreender como os diferentes tipos de uso e manejo podem influenciar na qualidade do solo, visando promover alternativas que promovam uma produção voltada para sustentabilidade e menor degradação dos ambientes de produção. Assim, este estudo tem por objetivo avaliar as alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos de um solo argiloso submetido à diferentes usos e manejos.

#### **4.4 MATERIAIS E MÉTODOS**

##### **4.4.1 Caracterização da área de estudo**

As áreas do estudo estão localizadas no município de São João do Ivaí - PR (23° 59' 35" S e 51° 49' 13" W), Brasil, com altitude média de 474 m acima do nível do mar. O clima é classificado como Cfa (Clima subtropical úmido), segundo Köppen-Geiger (KOEPPEN, 1948), com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo, sem estação seca definida (ALVARES et al., 2013).

O solo das áreas de estudo foi considerado argiloso, pois apresentou teores de argila que variaram entre 345 e 537 g kg<sup>-1</sup>, segundo Prado (2017), solos com esses teores de argila são considerados de textura argilosa. Os teores de areia, silte e argila do solo nas diferentes áreas de estudo estão descritos na tabela 2.

**Tabela 2.** Teores de areia, silte e argila do solo nas quatro áreas de estudo e em duas profundidades.

Tratamentos	Profundidade 0-10 cm		
	Areia	Silte	Argila
	g kg <sup>-1</sup>		
Lav <sup>(1)</sup>	293	240	467
Lav Con <sup>(2)</sup>	315	254	431
Pas <sup>(3)</sup>	303	266	431
Floresta	355	300	345
	Profundidade 10-20 cm		
Lav <sup>(1)</sup>	251	212	537
Lav Con <sup>(2)</sup>	318	246	436
Pas <sup>(3)</sup>	254	282	463
Floresta	307	313	380

<sup>1</sup>Lavoura; <sup>2</sup>Lavoura consorciada; <sup>3</sup>Pastagem;

A textura do solo não é sofre alterações pelo manejo exercido no solo, mas possui a capacidade de influenciar demais atributos que expressam a qualidade do solo, como densidade, porosidade, estrutura entre outros. Assim, saber a textura do solo é de extrema importância para avaliar os atributos físicos que ajudam a mensurar a qualidade do solo.

#### 4.4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente causalizado (DIC), uma vez que foram coletadas cinco amostras compostas em triplicata em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm), em quatro áreas com usos distintos, totalizando quatro tratamentos e cinco repetições por área de estudo.

A primeira área consiste em um cultivo de culturas anuais em plantio direto sem rotação de culturas citado como tratamento “*lavoura*”, as culturas utilizadas nessa área são a soja na safra de verão e milho na safra de inverno. A segunda área consiste em cultivo de culturas anuais com consórcio de *Urochloa ruziziensis* junto ao milho durante a safra de inverno denominado “*lavoura consorciada*”. A terceira área é formada por pastagem que não recebe reforma há mais de dez anos, citada

no trabalho como “*pastagem*”. A quarta área consiste em mata nativa, sem intervenções antrópicas denominada “*floresta*”.

Por se tratar de uma área cercada por propriedades que praticam agricultura, a área de floresta acaba sofrendo influência dos manejos praticados em seu entorno, como por exemplo, deriva de produtos químicos aplicados, carregamento de corretivos, como calcário, pela ação do vento, ação de adubação potássica, que muitas vezes é aplicada a lanço nas áreas de agricultura e acaba atingindo as bordas da floresta, esses motivos levam a conclusão de que, essa área de floresta, mesmo apresentando características vegetativas que a enquadram como nativa, pode apresentar indicadores de um solo que já recebeu algum tipo de manejo.

#### 4.4.3 Determinação dos Atributos Físicos do Solo

As coletas das amostras de solos para caracterização física foram realizadas conforme a metodologia da Embrapa (2017). Os teores de areia grossa e fina, silte e argila foram determinados pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2017).

Para a argila dispersa em água (ADA), também foi utilizada a metodologia da Embrapa (1997), pelo método da pipeta. 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).

A porosidade do solo (porosidade total, macro e micro porosidade) foi determinada pelo método da mesa de tensão descritos em Embrapa (2017). Já a densidade do solo (Ds) foi obtida através do método do anel volumétrico, desenvolvida por Gardner (GARDNER, 1958).

Para a estabilidade de agregados, a metodologia consiste na coleta e preparo de amostras de solo, as quais foram umedecidas para facilitar a separação dos agregados. Foram calculados os índices de Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) (KEMPER e ROSENAU, 1986). Esses índices quantitativos foram utilizados para calcular o Índice de Estabilidade dos Agregados do Solo (IEA) (LE BISSONNAIS, 1996; CASTRO FILHO et al., 1998; MADARI, 2004;).

#### 4.4.4 Determinação dos atributos químicos do solo

As coletas de solo foram realizadas conforme Filizola et al. (2006). Os procedimentos para as determinações analíticas de pH, H<sup>+</sup>Al, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> foram realizadas de acordo com metodologias descritas por Pavan et al. (1992) no Laboratório de Solos da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR. O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método Walkley-Black (TEIXEIRA et al., 2017).

#### 4.4.5 Determinação dos Atributos Biológicos

Os atributos microbiológicos do solo das áreas estudadas avaliados no Laboratório de Solos do UEL. Os níveis de carbono da biomassa microbiana (CBM) foram analisados pelo método de clorofórmio fumigação-extração, proposto por Vance et al. (1987). Para os níveis do nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) foi utilizado o método proposto por Brookes et al. (1985).

A respiração basal do solo foi determinada pelo método da incubação, proposto por Jenkinson e Powlson (1976) e adaptado por Silva, Azevedo e De-Polli (2007) e expresso em mg C-CO<sub>2</sub> Kg solo<sup>-1</sup> hora<sup>-1</sup>.

O quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) foi calculado a partir da razão entre a respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo. O quociente microbiano foi estimado através da relação entre CBM e COT (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

#### 4.4.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey em 5% de probabilidade. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada para facilitar a visualização de dados multidimensionais em gráficos bidimensionais, ajudando a identificar padrões, tendências e agrupamentos que não seriam visíveis em dimensões mais altas.

As variáveis foram submetidas a análises de correlação de Pearson para verificar se existe relação entre os indicadores avaliados, e no caso de existência de correlação, se é positiva ou negativa. Todas as análises foram realizadas usando o ambiente R v.3.4.3 (R Core Team, 2023).

## 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.5.1 Atributos físicos do solo

A tabela 3 apresenta os dados referentes à Argila Dispersa em Água (ADA), Índice de Floculação (IF) e Índice de Dispersão (ID), para os usos estudados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

**Tabela 3.** Valores de ADA, IF e ID para os tratamentos estudados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

Tratamentos	ADA	IF	ID
	%	%	%
Profundidade 0-10 cm			
Lav <sup>(1)</sup>	30,0 b	35.76 a	64.24 b
Lav Con <sup>(2)</sup>	36.6 a	15.08 b	84.92 a
Pas <sup>(3)</sup>	38.2 a	11.37 b	88.63 a
Floresta	24.3 c	29.56 a	70.43 b
CV (%)	9.22	32.98	9.82
p-valor	p<0.001	p<0.001	p<0.001
Profundidade 10-20 cm			
Lav <sup>(1)</sup>	32.7 ab	39.11 a	60.89 c
Lav Con <sup>(2)</sup>	39.9 a	13.53 c	86.47 a
Pas <sup>(3)</sup>	38.1 ab	17.78 bc	82.20 ab
Floresta	31.4 b	24.74 b	75.26 b
CV (%)	11.38	21.81	6.81
p-valor	0.011	p<0.001	p<0.001

<sup>1</sup>Lavoura; <sup>2</sup>Lavoura consorciada; <sup>3</sup>Pastagem; Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

Na profundidade de 0-10 cm, a ADA foi maior nas áreas de lavoura consorciada e pastagem, se diferenciando estatisticamente dos demais tratamentos. Esse resultado acarretou em um IF maior nos tratamentos de lavoura e mata, e um ID maior na lavoura consorciada e pastagem. Para a profundidade de 10-20 cm, a área de lavoura consorciada apresentou o maior percentual de ADA e conseqüentemente menor IF e maior ID entre os usos do solo estudados.

Para explicar os resultados da tabela 5, é necessário entender que a dispersão da argila está diretamente relacionada ao comportamento da dupla camada difusa, aos teores de argila no solo, à interação entre minerais e MO, além dos níveis de cátions e microrganismos presentes (ASSOULINE; TAVARES-FILHO; TESSIER, 1997). Essa dispersão das partículas coloidais está ligada à interação das cargas elétricas em suas superfícies e pode ocorrer por substituição isomórfica (permanente) ou pela dissociação de radicais (variável). A dissociação e neutralização do Al<sup>3+</sup> trocável, que estabiliza a estrutura do solo têm um efeito

dispersante (JUCKSCH, 1987; PAVAN E ROTH, 1992), contribuindo para a dispersão do solo em partículas unitárias.

Outros íons, como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , também podem favorecer a dispersão dos coloides do solo. De acordo com Morelli e Ferreira (1987), os carbonatos atuam como neutralizadores do efeito floculante dos cátions  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$ , levando ao aumento do pH e das cargas negativas dos óxidos de Fe e Al, além da caulinita, o que resulta no efeito dispersivo.

Desta forma, os valores de ADA encontrados neste estudo (tabela 03), podem estar relacionados ao valor de pH, teor de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  encontrados nos solos estudados. Os valores de  $\text{Ca}^{2+}$  variaram de 7,29  $\text{cmolc/dm}^3$  (área de lavoura) a 12,49  $\text{cmolc/dm}^3$  (floresta) e de  $\text{Mg}^{2+}$  1,269  $\text{cmolc/dm}^3$  (lavoura) a 2,141  $\text{cmolc/dm}^3$  (floresta) (tabela 6), esses teores são considerados altos segundo Sobral et al. (2015).

Esses elevados teores dessas bases trocáveis justificam os valores de ADA entre os solos estudados, uma vez que, quanto menor a valência do elemento, maior é sua dupla camada difusa, o que concomitantemente aumenta a dispersão. Outro fator que justifica os valores de ADA apresentados na tabela 5 são os valores de  $\text{K}^+$ , que foram considerados altos em todos os usos do solo (tabela 2) (SOBRAL et al., 2015). Cátions monovalentes, como o  $\text{K}^+$ , são mais hidratáveis, facilitando a dispersão do solo.

Em contrapartida, cátions com maior valência, como o  $\text{Al}^{3+}$ , contribuem para diminuir a ADA e aumentar o IF, pois são mais floculantes. Esse comportamento foi observado nos valores de IF apresentados na tabela 5 nas duas profundidades estudadas, sendo que, a área de lavoura apresentou os maiores teores de  $\text{Al}^{3+}$  nas duas profundidades estudadas (0,2  $\text{cmolc/dm}^3$  em 0-10 cm e 0,256  $\text{cmolc/dm}^3$  em 10-20 cm) (tabela 6), e apresentou os maiores valores de IF (35,76% e 39,11% em 0-10 e 10-20 cm respectivamente) (tabela 3), esses resultados confirmam a correlação existente entre os teores de  $\text{Al}^{3+}$ , ADA e IF do solo.

Na tabela 4, são apresentados os resultados de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e  $D_s$  para os diferentes usos e manejo, para as profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

**Tabela 4.** Valores de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo para os usos e manejos do solo estudados em duas profundidades.

Tratamento	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade total	Densidade do solo (Ds)
	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	g cm <sup>-3</sup>	g cm <sup>-3</sup>
Profundidade 0-10 cm				
Lav <sup>(1)</sup>	0,017 b	0,446 a	0,463 a	1,630 a
Lav Con <sup>(2)</sup>	0,040 b	0,339 ab	0,379 a	1,571 a
Pas <sup>(3)</sup>	0,032 b	0,402 ab	0,435 a	1,529 a
Floresta	0,157 a	0,313 b	0,470 a	1,043 b
CV (%)	15,11	9,11	7,27	6,59
p-valor	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001
Profundidade 10-20 cm				
Lav <sup>(1)</sup>	0,034 ab	0,390 a	0,424 a	1,692 a
Lav Con <sup>(2)</sup>	0,051 ab	0,358 a	0,409 a	1,587 ab
Pas <sup>(3)</sup>	0,023 b	0,347 a	0,370 a	1,641 a
Floresta	0,063 a	0,360 a	0,423 a	1,455 b
CV (%)	21,64	7,85	12,65	4,99
p-valor	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001

<sup>1</sup>Lavoura; <sup>2</sup>Lavoura consorciada; <sup>3</sup>Pastagem; Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

Pode-se observar que a maior macroporosidade na profundidade de 0-10 cm foi encontrada na floresta (0,157 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), e os demais usos são estatisticamente iguais para a camada superficial. Isso sugere que a presença de cobertura vegetal, como na mata, favorece a formação de poros maiores no solo, enquanto a agricultura intensiva pode reduzir a macroporosidade. Para a profundidade de 10-20 cm, o maior valor de macro porosidade também foi encontrada na mata (0,063 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>). A área da pastagem diferenciou-se dos demais usos e as duas áreas de lavoura não se diferenciaram entre si.

A macroporosidade é uma medida dos poros maiores no solo, que são importantes para aeração e infiltração de água. A área de lavoura tende a reduzir a macroporosidade do solo devido à compactação causada pelo uso de maquinário agrícola e práticas de cultivo intensivo. Em um estudo na Amazônia, a conversão de floresta para lavoura reduziu a macroporosidade do solo para menos de 10% na camada superficial (0-10 cm) (MORATELLI et al., 2023).

As pastagens manejadas de forma extensiva podem manter ou até melhorar a macroporosidade devido à atividade biológica e ao acúmulo de MO. No entanto, pastagens intensivamente manejadas podem sofrer compactação significativa. Pinto et al. (2017) observaram que a conversão de Cerrado para pastagem reduziu a porosidade do solo, impactando negativamente a infiltração de água. Solos sob mata geralmente apresentam a maior macroporosidade devido à ausência de

compactação e à alta atividade biológica. Castilho et al. (2016) encontraram que a conversão de floresta para pastagem na Amazônia resultou em uma perda significativa de macroporos, reduzindo a qualidade física do solo.

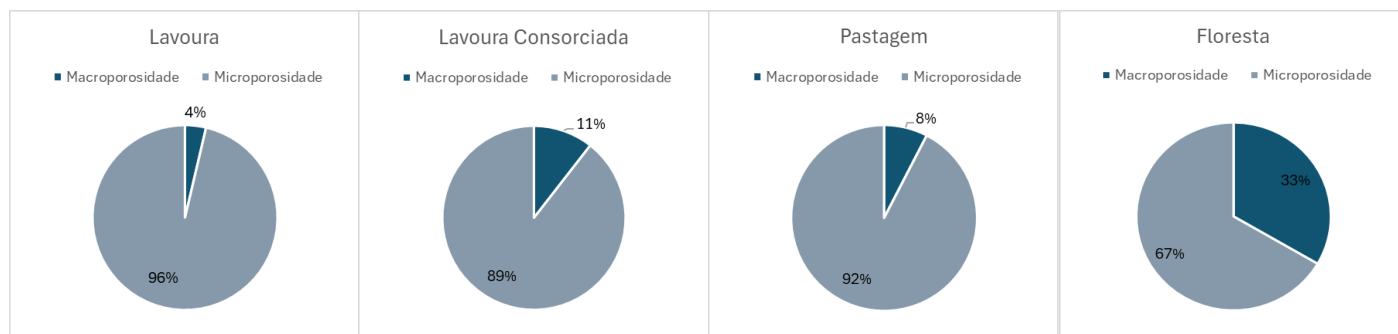
O valor de microporosidade, para a camada superficial, foi mais alto na área de lavoura ( $0,446 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ ) diferenciando estatisticamente dos demais usos. As áreas de lavoura consorciada e pastagem não apresentaram diferenças estatísticas e a mata diferenciou-se dos demais usos com o menor valor de microporosidade para a camada de 0-10 cm. Para a profundidade de 10-20 cm, os valores de microporosidade não diferiram entre os usos, variando de  $0,347 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$  a  $0,390 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ . Isso indica que, nessa profundidade, a presença ou ausência de cobertura vegetal não teve um impacto significativo na quantidade de poros menores no solo.

Cherubin et al. (2016) relatou que a microporosidade em áreas de cultivo de cana-de-açúcar era significativamente menor do que em áreas de pastagem e floresta nativa. Na área de pastagem, a microporosidade varia com o manejo, mas segundo Moratelli et al. (2023), áreas de pastagens intensivamente manejadas apresentaram menor microporosidade em comparação com pastagens menos intensivas e florestas. A microporosidade é geralmente mais alta em solos de mata nativa devido à alta atividade biológica e presença de MO (DALPOSSO et al., 2020).

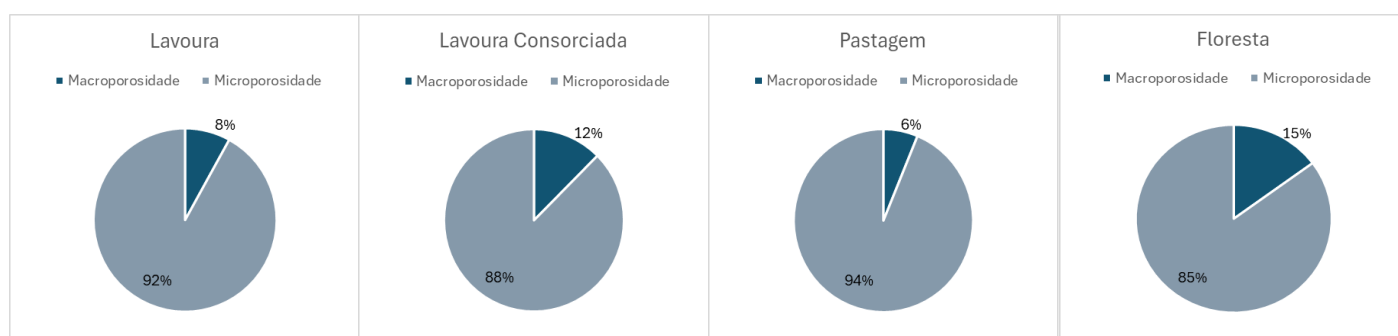
Porém esse trabalho apresentou resultados opostos, com valores de microporosidade para a camada de 0-10 cm menores para área de floresta em comparação aos demais usos. Esse resultado pode ser atribuído ao menor valor de ADA e menor valor de densidade do solo apresentado para a camada superficial em relação a floresta com os demais usos do solo estudados neste estudo (tabela 4). Uma vez que, o uso com maior microporosidade (lavoura), apresentou maior valor de ADA (tabela 3) e densidade do solo (tabela 4), indicando que o uso mais intensivo causa depreciação de atributos que mensuram a qualidade física do solo.

Para os valores de porosidade total do solo, os resultados não diferiram estatisticamente considerando os quatro usos nas duas profundidades. Em valores absolutos, observou-se que a floresta possui a maior porosidade total ( $0,470 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ ), seguida pela lavoura ( $0,463 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ ), pastagem ( $0,435 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ ), e lavoura consorciada ( $0,379 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ ) na camada superficial. Essa tendência persistiu na camada de 10-20 cm.

Apesar da não diferenciação estatística da porosidade total, os usos do solo influenciaram na proporção entre os macros e microporos, conforme descrito nas figuras 3 e 4.



**Figura 3.** Distribuição de macro e microporos na profundidade de 0-10 cm para os usos e manejos do solo estudados.



**Figura 4.** Distribuição de macro e microporos na profundidade de 10-20 cm para os usos e manejos do solo estudados.

Determinar apenas a porosidade total de um solo, não é o suficiente para determinar se a quantidade de poros é adequada ou não, portanto, verificar o equilíbrio entre os poros maiores e menores (macro e microporos), é imprescindível para definir se a estrutura do solo está adequada. Diferenças na distribuição do tamanho dos poros de um solo podem afetar a aeração, permeabilidade e retenção de água (TAVARES, 2016).

Os microporos, conhecidos como poros capilares, são de origem textural e desempenham o papel de reter a água no solo, enquanto os macroporos são de origem estrutural e responsáveis pela drenagem e aeração do solo (BRADY, 1979). Uma distribuição adequada entre macro e microporos, é em torno de 2/3 de macroporos e 1/3 de microporos (TAVARES, 2016), isso, assegura ao solo melhor aeração, permeabilidade e retenção de água.

De acordo com os resultados observados nas figuras 3 e 4, o único uso de solo que apresentou a distribuição adequada de poros, segundo Tavares (2016), foi a área ocupada com floresta na profundidade de 0-10 cm. Todos os demais usos apresentaram proporções maiores de micro:macroporos que as consideradas ideais para o desenvolvimento de culturas agrícolas. Assim, é essencial compreender a distribuição do tamanho dos poros para uma melhor compreensão da relação entre a porosidade e os processos físicos que ocorrem no (TAVARES, 2016).

Áreas em que foi exercido algum tipo de manejo no solo demonstram condições de distribuição inadequadas de macro e microporos. Essa distribuição inadequada pode contribuir para a degradação do solo e afetar negativamente a produção agrícola e a sustentabilidade do ecossistema por alguns fatores, segundo os estudos de Lal (2015), Horn et al. (1994), Bronick e Lal (2005), e Ferreira et al. (2010), a distribuição inadequada dos poros do solo pode causar:

i) Redução da infiltração de água: Uma distribuição inadequada de poros pode resultar em uma menor capacidade de infiltração de água no solo. Isso pode levar à erosão do solo, perda de nutrientes e menor disponibilidade de água para as plantas.

ii) Aeração insuficiente: A falta de macro e microporos adequados pode restringir a entrada de ar no solo e alterar as taxas de trocas gasosas, resultando em aeração insuficiente das raízes das plantas e comprometendo sua capacidade de respirar e absorver nutrientes.

iii) Compactação do solo: Uma distribuição desigual de poros pode contribuir para a compactação do solo, especialmente em camadas superficiais. Isso pode prejudicar o desenvolvimento das raízes, reduzir a infiltração de água e aeração, e limitar o crescimento das plantas.

iv) Prejuízo à biota do solo: A falta de poros adequados pode afetar negativamente a atividade biológica do solo, incluindo microrganismos benéficos e organismos do solo, que desempenham funções importantes na decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e manutenção da saúde do solo.

Para os valores de  $D_s$  encontrados neste trabalho (tabela 4), a mata apresentou diferença estatística para os demais usos nas duas camadas apresentando os menores valores. Isso indica que a vegetação natural contribui para uma menor compactação do solo em comparação com áreas agrícolas para as duas profundidades avaliadas. Os resultados propõem que a presença de cobertura

vegetal tende a promover uma maior porosidade e uma menor Ds em comparação com áreas agrícolas intensivas (lavoura consorciada e lavoura). Isso ressalta a importância da gestão da cobertura vegetal e práticas agrícolas sustentáveis na preservação da estrutura do solo e na qualidade do solo.

Alguns estudos reportados na literatura relataram valores ideais de densidade para solos argilosos. Derpsch et al. (1991), afirma que densidade do solo menor que  $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ , dificilmente irá gerar problemas de aeração do solo enraizamento das plantas, o autor considera que valores de densidade do solo superiores a  $1,25 \text{ g cm}^{-3}$  podem levar ao aparecimento de problemas.

Camargo e Alleoni (1997) propuseram que o valor crítico relativo à Ds de um Latossolo Vermelho deve ser de  $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ . Valor muito próximo ( $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ ) foi indicado por De Maria et al. (1999) para um Latossolo Vermelho, afirmando que a partir desta densidade ocorre restrição ao desenvolvimento radicular quando o solo se encontra em capacidade de campo, caracterizando compactação do solo.

Corsini e Ferraudó (1999), afirmaram que valores de Ds entre  $1,27$  e  $1,57 \text{ g cm}^{-3}$  pode ser restritivo para o crescimento radicular de culturas agrícolas e à infiltração de água no solo. Reinert e Silva (2001), determinaram que um solo argiloso, com teor de argila entre  $200$  e  $550 \text{ g kg}^{-1}$  (situação do solo deste estudo, tabela 2), tem como valor crítico de densidade  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ . De maneira geral, o limite crítico de Ds é de  $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ , que aumenta com o decréscimo do teor de argila do solo (SOUZA et al., 2005).

Desta forma, evidenciou-se que a Ds para os usos de lavoura, lavoura consorciada e pastagem apresentaram valores considerados restritivos para o máximo potencial de desenvolvimento das culturas agrícolas. Valores críticos de Ds estão relacionados com condições restritivas ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, à infiltração e ao transporte de água, bem como às trocas gasosas entre o solo e a atmosfera (FONSECA et al., 2007).

A Ds do solo relaciona-se com a compactação, que é uma preocupação significativa na agricultura e no manejo, pois afeta a infiltração de água, a aeração, a penetração de raízes e a produtividade das culturas. A compactação do solo resulta na restrição do crescimento das raízes, diminuição da acessibilidade aos nutrientes e aumento da perda de nutrientes do solo por lixiviação, escoamento e perdas gasosas para a atmosfera que podem afetar o crescimento das plantas. Além disso, o efeito da compactação do solo sobre o rendimento das lavouras é negativo (SAQIB

et al., 2004). A *Uruchloa ruzizensis* possui um sistema radicular robusto que ajuda a descompactar o solo e melhorar sua estrutura.

Estudos indicam que a inclusão de gramíneas perenes como a *Uruchloa ruzizensis* pode reduzir a compactação do solo devido à ação das raízes que promovem a bioturbação e aumentam a porosidade (DEBIASI; FRANCHINI, 2012; NAWAZ et al., 2013). A cobertura florestal natural mantém uma estrutura do solo mais saudável devido à ausência de tráfego pesado e à decomposição de MO que contribui para a formação de agregados e poros.

Os resultados encontrados nesse estudo mostraram que práticas de manejo e tipo de cobertura vegetal influenciam significativamente a densidade e consequentemente na compactação do solo. A agricultura intensiva sem medidas de mitigação resulta em maior densidade, enquanto a inclusão de plantas com sistemas radiculares profundos, como a *Uruchloa ruzizensis*, pode reduzir a densidade. Áreas de mata nativa mantém a menor densidade devido à menor interferência humana e à maior acúmulo de MO. Esses resultados destacam a importância de práticas de manejo sustentáveis e da inclusão de coberturas vegetais adequadas para minimizar os efeitos da compactação do solo e promover a saúde e produtividade do solo a longo prazo (BATEY, 2009).

Para analisar a influência dos diferentes usos na qualidade física do solo também foram avaliados os valores de DMP e DMG, que são importantes na análise física do solo, fornecendo informações sobre a distribuição e o tamanho dos agregados do solo, sendo uma indicação da qualidade da estrutura do solo. Os valores de DMP, DMG e IEA estão descritos na tabela 5.

O maior resultado de DMP na profundidade de 0-10 cm foi observado na área de mata (tabela 5), diferindo estatisticamente dos demais usos do solo, reforçando que a presença de cobertura vegetal, como na floresta, melhora a estabilidade dos agregados do solo em comparação com áreas de agricultura intensiva. A maior DMP na mata pode ser atribuída à maior MO e à atividade biológica nessas áreas, que promovem a formação e a estabilização dos agregados do solo (ARMAS-HERRERA et al., 2019). A mesma tendência entre o DMP e a área de mata foi observada na camada de 10-20 cm.

**Tabela 5.** O Diâmetro Médio Ponderado (DMP), o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e o Índice de Estabilidade dos Agregados do Solo (IEA).

Tratamento	DMP (mm)	DMG (mm)	IEA (%)
Profundidade 0-10 cm			
Lav <sup>(1)</sup>	22,84 c	1,49 b	55,90 c
Lav Con <sup>(2)</sup>	26,58 b	1,85 a	68,94 b
Pas <sup>(3)</sup>	26,62 b	1,87 a	64,27 b
floresta	35,47 a	1,44 b	77,52 a
CV (%)	4,46	8,78	4,96
p-valor	p<0,001	p<0,001	p<0,001
Profundidade 10-20 cm			
Lav <sup>(1)</sup>	3,57 c	1,46 a	47,87 c
Lav Con <sup>(2)</sup>	3,38 c	1,40 b	68,58 b
Pas <sup>(3)</sup>	5,29 b	1,25 c	73,30 b
floresta	13,06 a	1,27 c	92,22 a
CV (%)	11,35	1,55	4,29
p-valor	p<0,001	p<0,001	p<0,001

<sup>1</sup>Lavoura; <sup>2</sup>Lavoura consorciada; <sup>3</sup>Pastagem; Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

Os resultados desse estudo indicaram que o tipo de uso do solo teve um alto impacto na diferenciação dos valores de estrutura do solo, uma vez que, nas duas profundidades, foram observados menores valores de DMP na área de lavoura, demonstrando que em áreas com atividades mais intensas, a presença de agregados menores supera os agregados maiores, isso, devido as intensas operações que promovem o revolvimento do solo e conseqüentemente alteração na sua estrutura.

. Na profundidade de 0-10 cm, observa-se que a área de floresta apresentou maior IEA (77,52%), seguido pela área de lavoura consorciada (68,94%), pastagem (64,27%), e por último, lavoura (55,90%), apresentando diferenças estatísticas entre a floresta e os demais. O fato da área de floresta se destacar neste índice, se deve a presença de MO, abundância de raízes das plantas, adição constante de resíduos vegetais e não perturbação do solo com operações agrícolas (CALEGARI et al., 2006).

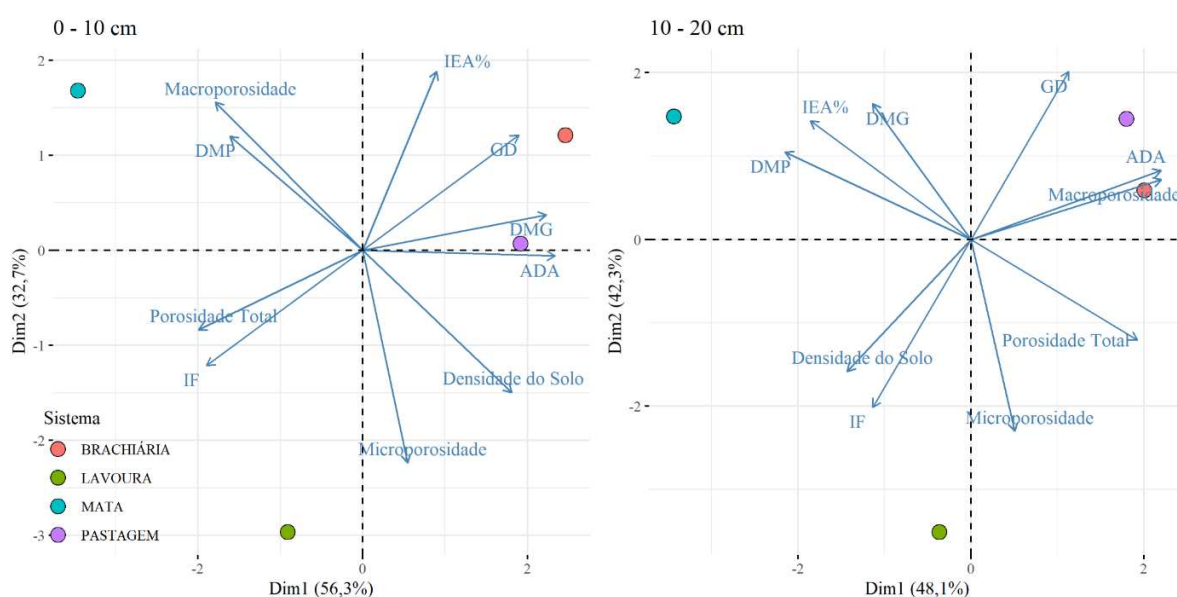
A área de lavoura consorciada não diferiu estatisticamente da área de pastagem para o IEA, mas chama a atenção pois apresentou resultado superior a área de lavoura. Isso sugere que a introdução de *Uruchloa ruzizensis* na lavoura teve um efeito positivo na estabilidade dos agregados do solo, possivelmente devido à presença de raízes adicionais e maior MO no sistema.

Na camada mais profunda (10-20 cm), a floresta apresentou o maior IEA (92,22%), se destacando estatisticamente dos demais e comprovando que o não revolvimento do solo melhora a estrutura do solo. A diferença entre os valores

absolutos de IEA para os usos do solo é mais pronunciada nesta profundidade, com a floresta mostrando uma estabilidade maior dos agregados do solo, em comparação com os demais usos, em resistir à desagregação pela água, reduzindo os riscos de erosão e escoamento superficial (TISDALL; OADES, 1982).

O uso com vegetação natural, como a mata, desempenha um papel importante na estabilidade dos agregados do solo, enquanto a atividade agrícola resultou em uma redução na estabilidade dos agregados, especialmente na camada superficial. A introdução de práticas de conservação do solo, como cultivo mínimo, rotação de culturas e cobertura morta, pode ajudar a melhorar a estabilidade dos agregados do solo em sistemas agrícolas.

Para compreender melhor a relação dos usos do solo com o DMP, DMG e IEA, aplicou-se a PCA (figura 5). Os dados foram padronizados para normalizar as divergências de escalas entre os atributos mensurados. Os mapas conceituais da PCA para os atributos físicos são considerados adequados, pois explicam em média 90% das variáveis estudadas.



**Figura 5.** Análise de PCA (Análise de componentes principais) para os atributos físicos do solo e os tipos de usos nas duas profundidades.

De acordo com a análise de PCA apresentada na figura 7, é possível observar como os atributos físicos do solo se correlacionaram. Na profundidade de 0-10 cm, macroporosidade e DMP se correlacionaram negativamente com densidade do solo e microporosidade, evidenciando que, quanto maior o valor de densidade do solo, maior também foi a microporosidade, oposto a isso, os valores de macroporosidade

e DMP diminuíram. Isso mostra que, com o aumento da densidade, o tamanho dos poros diminui, predominando poros menores, que podem dificultar o desenvolvimento das raízes das plantas, uma vez que a proporção ideal de macro e microporos no solo é de 2/3 de macroporos e 1/3 de microporos (TAVARES, 2016).

Por outro lado, conforme aumentou a macroporosidade, também aumentou o valor do DMP, demonstrando que conforme o solo possui poros maiores, o tamanho médio dos agregados também aumenta, evidenciando um solo mais estruturado, esses dois atributos também demonstraram relação com a área de mata, sendo que, confirmando a força da MO em promover solos mais porosos e com maiores agregados.

Outro ponto importante a ser observado na figura 7, são os valores de IF e ID, que apresentaram correlação negativa, confirmando que quanto maior for o ID de um solo, menor será seu IF. Nesta mesma linha, a ADA apresentou comportamento tendencial aos valores de ID, DMG, densidade e microporosidade, comprovando que, com o aumento do valor de ADA, atributos que podem levar ao processo de degradação do solo, como ID e densidade, tendem a aumentar.

Na profundidade de 10-20 cm, alguns atributos físicos apresentaram comportamento parecido a camada superficial, a ADA se correlacionou positivamente com ID e negativamente com o IF. Nesta profundidade, o valor de porosidade total seguiu a tendência da microporosidade e DMP, DMG e IEA obtiveram a mesma tendência de comportamento, mostrando que, um solo com agregados mais estáveis, tende a apresentar maiores valores de DMP e DMG, esses três últimos se demonstraram mais íntimos da área de mata do que dos demais usos do solo.

Desta forma, os resultados da PCA destacam a influência do tipo de uso do solo sobre os seus atributos físicos, e destaca como esses atributos exercem influência um sobre os outros, enfatizando que a análise da qualidade do solo não pode ser realizada utilizando apenas um fator isolado, mas sim, empregando o uso de diversos atributos em conjunto.

#### 4.5.2 Atributos químicos do solo

Os atributos químicos avaliados nos diferentes usos e manejos do solo, para as duas profundidades estudadas (0-10 cm e 10-20 cm), estão apresentados na tabela 6. Pode-se observar que a área de lavoura foi a que apresentou os menores valores para V%, SB e CTC diferindo estatisticamente dos demais tratamentos para a profundidade 0-10 cm. A área de floresta apresentou o maior valor pH nas duas profundidades estudadas (0-10 cm e 10-20 cm). Os usos de lavoura e lavoura consorciada foram os que apresentaram menores valores de pH, mas não diferiram da área de pastagem na profundidade de 0-10 cm. Segundo Pavinato (2017), valores de pH em CaCl<sub>2</sub> entre 5,0 e 5,5 são considerados altos, e valores acima de 5,5 são considerados muito alto.

**Tabela 6.** Atributos químicos do solo avaliados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm nos usos e manejos estudados.

Tratamentos	pH <sup>(4)</sup> CaCl <sub>2</sub>	MO <sup>(5)</sup>	COT <sup>(6)</sup>	P <sup>(7)</sup>	K <sup>(8)</sup>	Ca <sup>2+</sup> <sup>(9)</sup>	Mg <sup>2+</sup> <sup>(10)</sup>	Ca+Mg <sup>(11)</sup>	H+Al <sup>(12)</sup>	Al <sup>3+</sup> <sup>(13)</sup>	SB <sup>(14)</sup>	CTC pH 7,0 <sup>(15)</sup>	V% <sup>(16)</sup>
		g k <sup>-1</sup>	mgP/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>								%	
Profundidade 0-10 cm													
Lav <sup>(1)</sup>	4,84b	28,88a	16,75a	11,10a	0,67a	6,02b	1,26b	7,29b	5,61a	0,2a	7,96b	13,57b	58,57c
Lav Con <sup>(2)</sup>	4,94b	23,59a	13,68a	12,3a	0,71a	9,48a	1,59ab	11,07ab	5,51a	0,11a	11,79a	17,30a	68,46bc
Pas <sup>(3)</sup>	5,36b	29,14a	16,90a	13,36a	0,65a	9,75a	1,83ab	11,59a	4,37ab	0,07a	12,25a	16,62a	73,44ab
Floresta	6,04a	28,38a	16,46a	14,22a	0,61a	10,35a	2,14a	12,49a	2,78b	0,07a	13,10a	15,89ab	82,18a
CV (%)	5,95	15,29	15,67	22,20	15,15	16,75	21,82	16,43	25,45	31,50	15,40	4,719	10,31
p-valor	p<0,001	0,163	0,232	0,707	0,445	0,001	0,013	0,001	0,005	0,054	0,001	0,006	0,001
Profundidade 10-20 cm													
Lav <sup>(1)</sup>	4,6b	15,47c	9,55b	7,89a	0,32c	6,31c	0,848b	7,16b	5,43a	0,256a	7,48b	12,91b	57,74c
Lav Con <sup>(2)</sup>	5,14ab	34,68a	19,05a	11,80a	0,64a	9,01ab	1,727a	10,73a	5,45a	0,062b	11,38a	16,83a	67,68b
Pas <sup>(3)</sup>	5,45a	20,33bc	15,20ab	10,65a	0,54ab	9,93a	1,48a	11,41a	3,86b	0,062b	11,95a	15,81a	75,61ab
Floresta	5,6a	24,38b	14,27ab	10,32a	0,48b	7,88b	1,98a	9,86a	3,28b	0,098b	10,34a	13,62b	76,079a
CV (%)	8,24	7,37	11,03	19,95	11,58	10,11	21,072	5,07	8,15	29,38	9,12	7,063	6,22
p-valor	0,011	p<0,001	0,002	0,47	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001

<sup>1</sup>Lavoura; <sup>2</sup>Lavoura consorciada; <sup>3</sup>Pastagem; <sup>4</sup>Potencial hidrogeniônico (CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>). <sup>5</sup>Matéria orgânica do solo. <sup>6</sup>Carbono orgânico total do solo. <sup>7</sup>Fósforo disponível no solo. <sup>8</sup>Potássio. <sup>9</sup>Cálcio. <sup>10</sup>Magnésio. <sup>11</sup>Soma de cálcio e magnésio. <sup>12</sup>Acidez potencial. <sup>13</sup>Alumínio. <sup>14</sup>Soma de bases. <sup>15</sup>Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (potencial). <sup>16</sup>Saturação por bases. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

A área de floresta se diferenciou estatisticamente para o atributo pH na profundidade de 0-10 cm quando comparado aos demais usos do solo (tabela 06) e as áreas de lavoura e lavoura consorciada apresentaram os menores valores para este atributo. Quando o mesmo indicador foi avaliado na profundidade de 10-20 cm, a área de pastagem e floresta não apresentaram diferenças significativas entre si e as áreas de lavoura e lavoura consorciada apresentaram os menores valores para o

pH (tabela 06).

Áreas de vegetação nativa normalmente apresentam pH mais ácido em comparação com áreas de lavoura, o resultado observado neste trabalho pode estar atribuído a influência do manejo na área de vegetação, principalmente em relação à calagem. Processos de carreamento de partículas pelo vento, como a deriva, podem ter acarretado o acúmulo de bases como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  no solo da área de floresta estudada, e como esta área não é cultivada, a extração de bases do solo é muito reduzida em comparação à área de lavoura, o que pode então, resultar em um resultado de pH maior na área de floresta quando comparada à área de lavoura.

Por outro lado, os baixos valores observados nas áreas de lavoura e lavoura consorciada, refletem a influência do manejo que vem acontecendo nestes solos, pois as plantas cultivadas exportam nutrientes considerados bases (Ca, Mg e K), e isso pode resultar na redução do pH do solo, já que muitos dos nutrientes retirados são basicamente sais (LAL, 2015; SANTOS et al., 2024).

A erosão também pode estar atrelada aos resultados de pH observados neste trabalho, segundo Santos et al. (2024), o constante revolvimento e menor cobertura de solos cultivados, acarretam na remoção da camada superficial quando comparados aos solos que possuem maior aporte de cobertura, como o da floresta, sendo que a maioria das bases trocáveis estão na camada superficial, e quando essa camada é afetada pelo manejo, o teor de nutrientes também é afetado, reduzindo as bases trocáveis e aumentando os valores de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  que contribuem para a acidificação do solo, conforme foi observado na tabela 6.

Outro fator que pode acidificar o solo ao longo do tempo é o uso intensivo de fertilizantes. A aplicação de fertilizantes nitrogenados, como ureia e sulfato de amônio, pode levar à acidificação do solo (GOULDING, 2016). É importante notar que o manejo adequado da lavoura pode ajudar a mitigar a acidificação do solo, como o uso de práticas de conservação do solo, rotação de culturas e aplicação de corretivos de pH, como calcário.

No atributo V%, a área de floresta se diferenciou estatisticamente nas duas profundidades estudadas, apresentando os maiores valores (82,18% e 76,07% em 0-10 e 10-20 cm, respectivamente), e os menores valores para este atributo foram observados na área de lavoura (58,57% e 57,74% em 0-10 e 10-20 cm, respectivamente), apresentando diferenças estatísticas das áreas de lavoura consorciada e floresta para as duas profundidades. O valor de V% foi maior no

ambiente de floresta pelo motivo desta área apresentar maior valor de pH, uma vez que em solos com pH mais elevado, as cargas negativas são ocupadas pelas bases do solo como  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , e em contrapartida, íons como  $H^+$  e  $Al^{3+}$  tem sua disponibilidade reduzida.

Para a CTC e SB, a área de lavoura foi a que apresentou menor resultado nas duas profundidades estudadas (tabela 06), visto que, para CTC, as áreas de lavoura e floresta apresentaram comportamento estatístico semelhante, e as áreas pastagem e lavoura consorciada de destacaram. Neste caso, a lavoura apresentou os menores valores de CTC e SB (13,57 e 7,96  $cmolc/dm^3$ , respectivamente em 0-10m e 12,91 e 7,48  $cmolc/dm^3$  em 10-20cm). Isso se deve ao fato da maior intensidade de exploração neste ambiente, contribuindo para uma maior degradação dos atributos químicos do solo. Neste ambiente, não ocorre rotação de culturas e nenhum sistema de incremento de MO é praticado.

Para Coutinho (2012) a área cultivada tem menores valores de CTC em comparação à área de floresta. Isso porque, a mesma está relacionada às práticas de manejo do solo e às condições ambientais características de cada tipo de uso. Em áreas de lavoura, a remoção contínua de colheitas e a falta de reposição adequada de material orgânico reduzem a quantidade de MO no solo, resultando em menor CTC. O uso frequente de fertilizantes sintéticos pode alterar o pH do solo, afetando a solubilidade e a disponibilidade de nutrientes, o que pode reduzir a CTC. Além disso, os pesticidas podem matar organismos benéficos do solo que ajudam na decomposição de MO e na manutenção da CTC.

Para os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , a área de floresta apresentou os maiores valores na profundidade de 0-10 cm (tabela 06). Na profundidade de 10-20 cm, a área de pastagem apresentou o maior valor para o  $Ca^{2+}$ , e para o  $Mg^{2+}$  não houve diferenciação significativa nas áreas de lavoura consorciada, pastagem e floresta. A área de lavoura obteve os menores valores para  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , diferindo estatisticamente dos demais.

Da Silva et al. (2023), observou esse comportamento quando comparou os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  em área de vegetação nativa e cultivada, e atribuiu esse resultado as condições de manejo mais intensivo em áreas de lavoura e maior aporte de MO em solos de floresta. Ainda, a MO exerce influência na solubilidade e a disponibilidade de nutrientes no solo, incrementando a quantidade de bases

trocáveis, como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , promovendo maiores teores destes nutrientes em ambientes como o de floresta (JAKELAITIS, et al., 2008; CURTIN et al., 2016).

Para o P, os valores não diferiram estatisticamente para as duas profundidades. Em números absolutos, os 3 tipos de uso (lavoura, lavoura consorciada e pastagem) obtiveram um valor de P menor em comparação ao valor para floresta, principalmente na profundidade de 0-10 cm (tabela 6).

Os resíduos florestais adicionados ao solo aumentam a disponibilidade de P especialmente em solos altamente intemperizados (NAIR et al., 1999). A inclusão da *Uruchloa ruzizensis* em consórcio com a lavoura de milho auxilia na dinâmica de nutrientes, possivelmente aumentando a retenção de P na biomassa vegetal. Essa gramínea possui mecanismos eficientes para adquirir fósforo de formas não lábeis, como fosfatos ligados a óxidos minerais. Essa habilidade é crucial para aumentar a disponibilidade de P no solo e sua absorção pela planta (MERLIN et al., 2016), e possivelmente o consórcio *Uruchloa ruzizensis* com o milho já tem propiciado esse incremento de P, uma vez que a área de consórcio já apresentou maiores valores absolutos de P quando comparados à área de lavoura sem a presença da gramínea.

Os valores de  $\text{K}^+$  não diferiram na profundidade de 0-10 cm, e na profundidade de 10-20 cm a área de lavoura consorciada apresentou o maior valor, se destacando dos demais usos do solo. Essa não diferenciação na camada superficial pode ser atribuída à mobilidade do  $\text{K}^+$ , que apresenta alta mobilidade no perfil do solo, reduzindo as diferenças entre os sistemas de uso e manejo (HINSINGER et al., 2021).

Para os valores de MO e COT na profundidade de 0-10 cm, os diferentes usos do solo não diferiram entre si. Já na profundidade de 10-20 cm, o manejo de lavoura se destacou com os menores teores de MO e COT, quando comparado usos do solo. Coutinho et al. (2017), observaram que áreas de pastagem e mata apresentaram maiores valores de MO e COT quando comparados com áreas de lavoura, que apresentou teores significativamente menores para esses dois atributos.

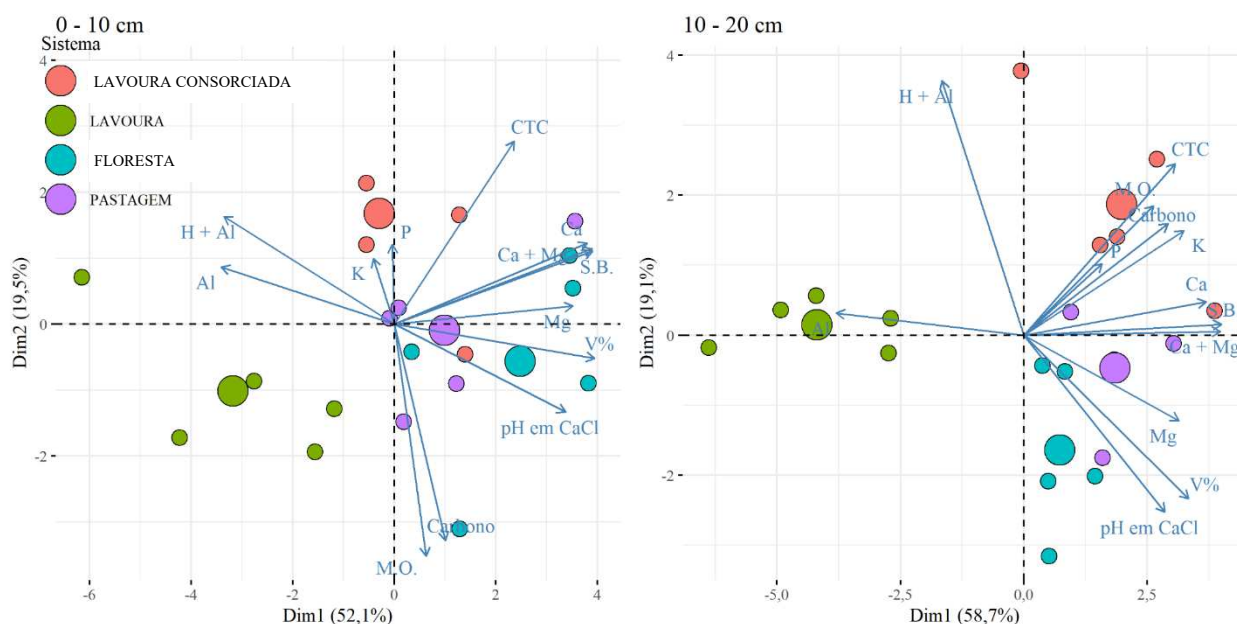
Os estudos encontrados na literatura, mostram o impacto da conversão do uso da terra nas diferenças de MO e carbono em solos. Fernandes et al. (1997) avaliaram as diferenças na MO entre áreas de floresta preservada e áreas convertidas para lavoura e concluíram que a conversão de matas preservadas em áreas agrícolas ou pastagens resulta em uma redução significativa na quantidade de MO presente no solo. Os autores relatam também a possibilidade devido à remoção da cobertura

vegetal natural da floresta preservada, por culturas agrícolas ou pastagens com menor teor de MO. Além disso, destaca-se a redução na MO do solo estar relacionada à diminuição na quantidade de carbono no solo e a conseqüentemente pode resultar em uma diminuição na capacidade do solo de reter nutrientes, reter água e fornecer suporte para a vida microbiana do solo.

Para Sánchez-Navarro et al. (2020), o armazenamento de carbono no solo sofre influência tanto da estratégia de uso e manejo empregado quanto de sua interação com o tipo de cultura cultivada. Práticas de manejo agrícola, como o uso de adubos químicos e a monocultura, podem contribuir para a diminuição dos teores de COT. O uso intensivo de fertilizantes pode aumentar a mineralização da MO, resultando em menores teores de carbono no solo. Assim, para uma mesma produção e deposição de biomassa microbiana ao solo, o teor de carbono pode variar de solo para solo, tendo em vista a qualidade do material aportado e a influência de diversos fatores sobre a microbiota do solo e conseqüentemente sobre a taxa de decomposição (COSTA, 2005).

No presente estudo, o maior valor de COT foi encontrado na área de lavoura consorciada na profundidade de 10-20 cm, também pode ser atribuído ao sistema radicular da gramínea, uma vez que o consórcio com o milho já vem sendo realizado a quatro safras de inverno consecutivas, e a *Uruchloa ruziziensis* possui um sistema radicular fasciculado e agressivo que garante uma grande exploração no solo, contribuindo para a melhoria de atributos físicos além do incremento dos teores de carbono do solo. Ribeiro et al. (2011) afirmaram que 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, corroborando com os resultados deste trabalho.

Para identificar a relação entre os usos e manejos com os atributos químicos do solo, a figura 6 apresenta a PCA para as duas profundidades estudadas, buscando encontrar quais usos estão correlacionados com o aumento ou redução da qualidade do solo. Os dados foram padronizados para normalizar as divergências de escalas entre os atributos mensurados. Os mapas conceituais da PCA são considerados adequados para avaliar as relações entre os atributos químicos e usos do solo, pois explicam mais de 50% das variáveis estudadas nas duas profundidades (71,6% em 0-10 cm e 77,8% em 10-20 cm).



**Figura 6.** Análise da PCA (Análise de componentes principais) para os atributos químicos do solo e os tipos de usos nas duas profundidades.

Para a profundidade de 0-10 cm, H+Al apresentaram correlação negativa com pH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB, CTC e V%, demonstrando que o aumento das bases trocáveis do solo tende a diminuir a acidez, para estes mesmos atributos, a área de floresta foi a que apresentou maior associação linear positiva entre os usos do solo estudados. MO e COT também apresentaram associação linear positiva com a área de floresta, fato observado pelos pontos que representam a florestas na mesma direção de MO e COT.

Os melhores resultados de bases, CTC e V% na área de floresta se atribui a influência do manejo nesta área, como descrito durante a metodologia, e também pelo fato do acúmulo de bases e MO na área sem a consequência do manejo extrativista das lavouras. Esse resultado corrobora com a influência da MO em promover a solubilidade e ciclagem de nutrientes no solo (MARTINS et al., 2023), acarretando no aumento dos teores das bases trocáveis disponíveis para as plantas e que também contribuem para a neutralização de elementos como o  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  que acidificam o solo e são tóxicos para as plantas (CURTIN et al., 2016).

A área de lavoura consorciada registrou pontos mais próximos de P e  $\text{K}^+$ , mostrando correlação destes nutrientes com este tipo de uso do solo. A *Uruchloa ruzizienis* possui um sistema radicular denso que propicia uma grande área de exploração no solo, e isso contribui para que um aumento da retenção de P e  $\text{K}^+$  na biomassa vegetal, que posteriormente será mineralizado e disponibilizado para as

plantas. Ainda, a gramínea é capaz de extrair fósforo de formas não lábeis, como fosfatos ligados a óxidos minerais, sendo uma habilidade importante para aumentar a disponibilidade de P no solo e facilitar sua absorção pelas plantas (MERLIN et al., 2016).

A área de lavoura apresentou comportamento oposto aos demais usos do solo, não apresentando correlação com os atributos químicos apresentados, demonstrando uma menor qualidade química do solo na camada superficial. Segundo Shah e Wu (2019), as práticas de manejo afetam diretamente a fertilidade e a capacidade do solo de sustentar a produção agrícola, desta forma, os autores afirmam que solos saudáveis são essenciais para promover a ciclagem de nutrientes e produtividade das culturas.

A influência do uso e manejo do solo na camada de 0-10 cm ficou mais evidente com a análise de PCA, demonstrando que, com o manejo intensivo, sem práticas conservacionistas, ocorre uma grande exportação de nutrientes que são bases para a manutenção do pH, CTC, SB e V% do solo (LAL, 2015), isso se confirma ao observar que os pontos que representam a lavoura ficaram isolados no mapa conceitual da PCA para 0-10 cm, e controversos aos atributos que representam uma melhor qualidade química do solo.

Para a profundidade de 10-20 cm, H+Al continuaram apresentando correlação negativa com pH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB, CTC e V%, seguindo a tendência apresentada em 0-10 cm. A área de lavoura se correlacionou fortemente com Al, comprovando que manejos mais intensivos tendem a diminuir a qualidade química do solo, uma vez que teores maiores de Al, reduzem a disponibilidade de nutrientes essenciais, além de ser tóxico para as plantas. Essa maior correlação da acidez com a área de lavoura na profundidade de 10-20 cm, é explicada pela diminuição do teor de MO em profundidade, principalmente na área de lavoura.

Pavinato e Rosolem (2008), retratam que o cultivo de lavouras que incrementam pouca MO ao solo, apresentarão também baixa decomposição de resíduos orgânicos, causando a redução do pH, acidificação e aumento dos teores de Al, corroborando com o resultado observado neste estudo.

A área de lavoura consorciada apresentou forte correlação com MO, COT, SB, P e CTC, confirmando que, além de contribuir para a melhoria da qualidade do solo em superfície, a *Uruchloa ruzizensis* pode também promover melhores condições químicas do solo em profundidade, graças ao seu sistema radicular agressivo que

apresentou nesse estudo resultados que evidenciam sua capacidade de acumular, principalmente MO em profundidade, e conseqüentemente, incremento dos teores de carbono do solo. Desta forma, evidencia-se que a preservação de ecossistemas nativos e práticas de manejo sustentável são essenciais para manter a saúde do solo e promover melhorias na qualidade do solo.

#### 4.5.3 Atributos biológicos do solo

Os resultados atributos dos atributos biológicos analisados nas diferentes áreas de estudo estão descritos na tabela 7.

**Tabela 7.** Valores de Respiração Basal do Solo (RBS), Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM), Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), Quociente Metabólico (qCO<sub>2</sub>) e Quociente Microbiano (qMic), para os diferentes usos do solo na profundidade de 0-10 cm.

Tratamento	RBS	CBM	NBM	qCO <sub>2</sub>	qMic
	mg kg <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	mg C g <sup>-1</sup> solo	mg N g <sup>-1</sup> solo	mg C-CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> CBM h <sup>-1</sup>	%
Profundidade 0-10 cm					
Lav <sup>(1)</sup>	17,86b	214,85b	29,4c	83,13a	12.79c
Lav Con <sup>(2)</sup>	14,43b	244,27b	45,2b	59,07b	17.74b
Pas <sup>(3)</sup>	19,54b	321,07a	85,4a	60,86b	19.12ab
Floresta	26.53a	377,64a	75,1a	70,25b	22.50a
CV (%)	7.81	14.44	12.17	22.34	13.23
p-valor	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001

<sup>1</sup>Lavoura; <sup>2</sup>Lavoura consorciada; <sup>3</sup>Pastagem; Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

Os resultados da RBS apresentaram diferenças estatísticas apenas para o tratamento floresta, que apresentou o maior valor para este atributo. Os demais usos do solo não diferiram estatisticamente entre si. A RBS consiste na associação de todas as atividades metabólicas que resultam na produção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e está relacionada com a umidade, temperatura, teor de MO, manejo e aeração do solo. De acordo com Zibilske (1994) a atividade metabólica do solo pode ser mensurada através da RBS que é considerado um ótimo bioindicador da qualidade do solo.

Nesta linha, quando se pensa em um solo de qualidade, busca-se uma maior atividade biológica deste meio, que pode ser representada pela RBS, ou seja, ambientes que apresentam maior RBS, provavelmente possuem maior quantidade de microrganismos em atividade, sendo que isso exercerá impacto direto na disponibilidade de carbono da biomassa microbiana (MERCANTE et al., 2018).

A RBS tende a ser maior em ecossistemas com cobertura florestal, como florestas, em comparação com áreas de uso agrícola ou pastagens. Essa diferença pode ser atribuída a vários fatores, uma maior quantidade de MO no solo, proveniente da decomposição contínua de folhas, galhos e outros detritos orgânicos existentes nas áreas de mata, conforme evidenciados por outros estudos (DAVIDSON et al., 2002; WANG et al., 2003; HUANG et al., 2020).

No estudo realizado por Davidson et al. (2002), a RBS variou significativamente entre os diferentes tipos de floresta. Essas variações foram atribuídas a diferenças na alocação de carbono e na respiração do solo, que estão ligadas às características específicas de cada tipo de floresta, como a composição da vegetação e as condições edáficas. Embora o foco principal do estudo de Davidson et al. (2002) seja em florestas, a comparação com áreas de lavoura pode indicar que práticas agrícolas tendem a reduzir a alocação de carbono subterrâneo, refletindo na diminuição da qualidade biológica do solo.

Parker e Sansó (2023) destacam que a presença de MO e menor perturbação do solo em áreas de floresta são conhecidas por sustentar uma maior biodiversidade microbiana e aumentar valores da RBS. Segundo Emadi et al. (2020) as pastagens também podem promover condições favoráveis para a atividade microbiana, o que é refletido na RBS.

Em contraponto, Zhao e Efremova (2023), afirmam que o uso intensivo do solo com lavouras pode afetar adversamente a RBS devido a compactação e redução da MO, afirmação que vai de encontro com os resultados apresentados neste trabalho, onde os usos mais intensos do solo resultaram em menores taxas de RBS entre os manejos estudados (tabela 7). Bongiorno et al., (2019) também afirma que sistemas intensivos de manejo do solo apresentam menor taxa de RBS, que afetam a qualidade do solo.

Portanto, a RBS é geralmente maior em áreas que possuem maior quantidade e qualidade da MO e biomassa microbiana mais abundante. Esses fatores combinados promovem taxas mais elevadas de atividade metabólica e respiração pelos microrganismos do solo comparados a qualquer outro tipo de uso do solo. Fica evidente a importância da cobertura do solo e do manejo adotado, uma vez que, quanto menor a interferência antrópica no ambiente, maior será a sua conservação, o teor de carbono, a MO e a atividade microbiótica, resultando assim, em valores de RBS mais elevados (ARAÚJO et al., 2007).

O segundo indicador também muito importante na avaliação da qualidade microbiológica do solo é o CBM, pois desempenha um papel crucial na saúde e na fertilidade do solo. A biomassa microbiana refere-se à quantidade de organismos microbianos vivos presentes no solo, como bactérias, fungos e actinobactérias. O carbono é um componente essencial da biomassa microbiana, sendo utilizado pelos microrganismos como fonte de energia (ZILLI et al., 2003). Os resultados encontrados de CBM para a camada superficial do solo (tabela 7), mostraram que a área de floresta e pastagem se diferenciaram dos demais usos do solo, apresentando  $377,65 \text{ mg C g}^{-1}$  solo e  $321,07 \text{ mg C g}^{-1}$  solo, respectivamente. Isso destaca a importância da vegetação nativa e cobertura do solo na manutenção de altos níveis de biomassa microbiana, devido à maior diversidade de plantas e menor perturbação do solo. Esse resultado elucidou que usos mais intensos tendem a diminuir a quantidade de microrganismos do solo, que conseqüentemente, levará a teores menores de CBM.

A conversão de áreas naturais para usos agrícolas frequentemente resulta em redução do CBM devido à remoção da vegetação nativa e práticas de manejo que afetam negativamente a microbiota do solo (ISLAM; WEIL, 2000; ANDERSON; DOMSCH, 1980). Essa afirmação dos autores está de acordo com os resultados apresentados neste trabalho, onde foram observados menores valores de CBM para áreas manejadas com lavouras, que apresentaram  $214,85 \text{ mg C g}^{-1}$  solo e  $244,27 \text{ mg C g}^{-1}$  solo, para os usos de lavoura e lavoura consorciada respectivamente, confirmando que solos manejados com culturas agrícolas apresentarão menor população microbiana quando comparados a solos menos manejados como pastagens e áreas de vegetação nativa.

Os resultados do NBM (tabela 7), indicam diferenças entre os diferentes usos do solo. Os maiores valores deste atributo foram atribuídos às áreas de pastagem ( $85,4 \text{ mg N g}^{-1}$  solo) e floresta ( $75,1 \text{ mg N g}^{-1}$  solo), diferindo estatisticamente da área de lavoura consorciada ( $45,2 \text{ mg N g}^{-1}$ ) e da área de lavoura ( $29,4 \text{ mg N g}^{-1}$ ). Como observado, as diferentes práticas de uso do solo têm um impacto significativo nos teores de NBM do solo, destacando a importância do manejo adequado das áreas de lavoura para a saúde do ecossistema e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Os valores elevados de NBM na floresta sugerem que os solos desses ambientes atuam como reservatórios naturais de nutrientes, incluindo o nitrogênio.

Esses ecossistemas têm a capacidade de reter e reciclar nutrientes de forma eficiente, o que resulta em maiores níveis de NBM devido à disponibilidade contínua de nitrogênio para a biomassa microbiana do solo. Em contrapartida, os solos agrícolas apresentam os menores índices de NBM, o que pode indicar uma diminuição na atividade microbiana e na disponibilidade de nitrogênio.

Segundo Wardle (1992), isso se deve ao uso intensivo da terra e a práticas agrícolas que empobrecem o solo, frequentemente alterando a ciclagem de nutrientes e reduzindo a disponibilidade de elementos essenciais para a microbiota. Baixos níveis de NBM indicam que a quantidade de nitrogênio disponível para os microrganismos é limitada, o que pode restringir seu crescimento e atividade, resultando em uma menor respiração basal, isso se correlaciona com o resultado de RBS apresentado neste trabalho, que foi menor na área de lavoura (tabela 7).

O  $qCO_2$  mede a eficiência respiratória da biomassa microbiana e é frequentemente usado como um indicador do estresse microbiano, um valor mais alto sugere que a microbiota está sob estresse e gastando mais energia para manter sua biomassa. Os valores para este índice apresentaram diferenças estatísticas apenas para o uso do solo com lavoura ( $83,13 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$ ), que foi o maior valor, indicando maior estresse microbiano (INSAM; HASELWANDTER, 1989).

A área de lavoura consorciada apresentou o menor valor absoluto de  $qCO_2$ , mesmo não diferindo estatisticamente das áreas de floresta e pastagem. Esse comportamento chama atenção, pois a integração de *Uruchloa ruzizensis* se apresentou como uma alternativa que pode ajudar a reduzir  $qCO_2$ , melhorando a qualidade do solo e promovendo a sustentabilidade agrícola, através do aumento da MO e COT do solo.

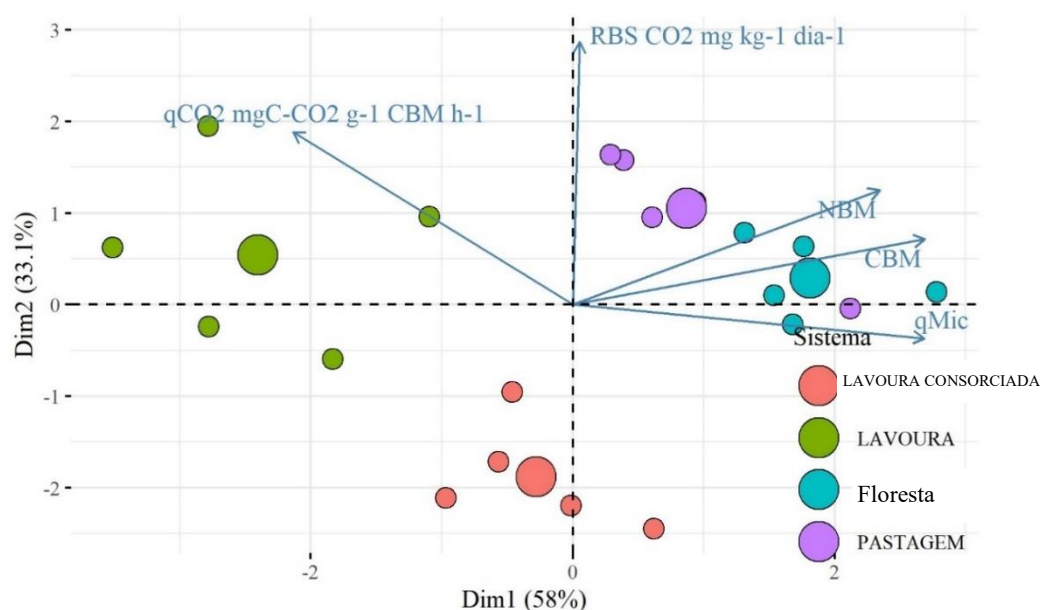
Segundo Lorenzetti et al. (2023), o uso de consorcio entre lavoura com *Uruchloa ruzizensis* pode aumentar a diversidade microbiana e reduzir o estresse do solo a longo prazo, resultado concomitante com o apresentado neste trabalho, uma vez que, a consorciação de lavouras e gramíneas vem sendo realizado a quatro safras na área de estudo. Esses estudos ajudam a compreender as variações observadas no  $qCO_2$  em diferentes usos do solo, destacando a influência das práticas de manejo e da vegetação na atividade microbiana do solo.

O  $qMic$  indica a quantidade de carbono do solo que está imobilizado na biomassa microbiana (SILVA et al., 2010). Desta forma, quanto menor for o valor do

qMic, menor é a eficiência dos microrganismos na imobilização do carbono (CARDOSO et. al., 2009). Os resultados observados neste trabalho para o qMic vem ao encontro do exposto pelos autores citados anteriormente, onde a área de floresta apresentou o maior valor para este atributo (22,50%), se destacando estatisticamente dos demais. A área de pastagem teve o segundo maior valor (19,12%), seguido da área de lavoura consorciada (17,74%), e da área de lavoura (12,79%), que obteve o menor valor. Esses resultados confirmam que em solos com menor aporte e qualidade da MO, a comunidade microbiana encontra-se em estresse, impossibilitando a utilização plena do carbono orgânico, e nessas situações, o qMic tende a diminuir (GAMA-RODRIGUES, 2008).

Desta forma, é possível afirmar que os menores resultados do qMic apresentados pela área de lavoura, indicam uma provável condição de estresse da população microbiana, decorrente da menor cobertura vegetal e, excepcionalmente da redução da quantidade e qualidade de materiais orgânicos provenientes dos restos culturais das lavouras cultivadas.

A figura 7 apresenta a análise de PCA buscando estabelecer relações entre os atributos biológicos estudados e os usos e manejos do solo. Os dados foram padronizados para normalizar as divergências de escalas entre os atributos mensurados. Os mapas conceituais da PCA para os atributos biológicos são considerados adequados, pois explicam 91% das variáveis estudadas.



**Figura 7.** Análise de PCA para os atributos biológicos do solo nos diferentes usos.

De acordo com os resultados apresentados na figura 7, é possível estabelecer que houve uma correlação negativa entre o  $qCO_2$  e o NBM, CBM e  $qMic$ , demonstrando que, quanto maior for a atividade microbiana expressa pelo  $qCO_2$ , menor será o aporte da biomassa microbiana e teor de carbono imobilizado no solo.

Com estes resultados, também foi possível observar que a área de lavoura apresentou forte correlação com o  $qCO_2$ , confirmando o fato de que áreas com manejos mais intensos e com menor aporte e qualidade de MO, apresentarão um aumento da respiração microbiana, resultado de uma decomposição intensa e rápida, que resulta em uma maior liberação de  $CO_2$  (SRADNICK et al., 2014).

Segundo Wang et al. (2003), a vegetação nativa pode aumentar a biomassa microbiana, isso se evidenciou nos resultados deste estudo, sendo que o NBM, CBM e  $qMic$  apresentaram correlação, e ainda, esses três atributos apresentaram forte correlação com a área de Floresta.

A área de pastagem apresentou pontos dispersos entre os indicadores estudados, ficando mais próxima da RBS e NBM, e apresentou pontos distantes do  $qCO_2$  que é o indicador que mais demonstra estresse e condições adversas para a comunidade microbiana do solo. Segundo Urbański e Jakubiak (2017), sistemas de pastagem podem apresentar menor atividade microbiana comparada à floresta devido a práticas de manejo que reduzem a diversidade de plantas e MO no solo.

Os resultados apresentados na figura 7, demonstram que o cultivo intensivo, como em lavouras agrícolas, pode resultar em variabilidade significativa na atividade microbiana e respiração do solo, dependendo do tipo de cultura, uso de fertilizantes e práticas de rotação de culturas (GÖMÖRYOVÁ et al., 2020). Correlações entre o CBM e NBM, geralmente indicam solos saudáveis, com uma comunidade microbiana ativa e com boa ciclagem de nutrientes.

#### 4.5.4 Correlações de Pearson entre os atributos do solo estudados

As tabelas 8, 9 e 10 apresentam as Correlações de Pearson, buscando analisar quais atributos do solo são variáveis linearmente correlacionadas. Quanto mais próximo de 1, mais forte é a correlação apresentada, e quanto mais próximo o valor de -1, menor a correlação entre os atributos analisados.

**Tabela 8.** Correlação de Pearson e *p*-valor para os atributos químicos (pH, Ca, Al e MO) e físicos (ADA, IF e ID) do solo.

<b>Atributos analisados</b>	<b>Correlação</b>	<b><i>p</i>-valor</b>
pH x ADA	0,296	0,12646
pH x IF	-0,643	0,00022
pH x ID	0,643	0,00022
Ca x ADA	0,083	0,67504
Ca x IF	-0,546	0,00263
Ca x ID	0,546	0,00263
Al x ADA	-0,133	0,50065
Al x IF	0,562	0,00185
Al x ID	-0,562	0,00185
MO x ADA	-0,135	0,4945
MO x IF	0,38	0,04638
MO x ID	-0,38	0,04638

Em azul: correlação positiva, em vermelho: correlação negativa.

As correlações apresentadas na tabela 8, evidenciam a influência dos atributos químicos com os atributos físicos do solo, sendo que, tanto o pH quanto o Ca, apresentaram correlações positivas com ADA e ID e correlações negativas com o IF, corroborando com o observado por Assouline et al. (1997), em que o comportamento da argila está relacionado com o comportamento da dupla camada difusa, e íons como o  $\text{Ca}^{2+}$  favorecem a dispersão e neutralizam o efeito floculante do  $\text{Al}^{3+}$  (MORELLI, FERREIRA; 1987), esse efeito reflete um aumento no pH, o que resulta no efeito dispersivo, resultados esses concomitantes com os observados neste trabalho, expostos nas tabelas 2 e 5, e comprovados pelas correlações demonstradas na tabela 8.

O efeito floculante do  $\text{Al}^{3+}$  ficou evidente ao observar correlação negativa entre ADA e ID e positiva com o IF, isso reforça a tese de que íons com maior valência, como o  $\text{Al}^{3+}$ , contribuem para o efeito floculante do solo. A MO também se mostrou favorável para contribuir com floculação do solo, pois apresentou correlações negativas com a ADA e ID e correção positiva com o IF.

É importante também, analisar como a ADA pode estar se correlacionada com demais atributos físicos do solo, como macroporosidade, microporosidade, porosidade total, Ds e IF, pois em solos com valores elevados de ADA, processos de degradação como compactação e erosão, podem se tornar mais frequentes. A tabela 9 apresenta essas correlações.

**Tabela 9.** Correlação de Pearson e p-valor para os atributos ADA, Índice de Dispersão (ID), Índice de Floculação (IF), Microporos, Macroporos, Porosidade Total (Pt) e Densidade do Solo (Ds).

Atributos analisados	Correlação	p-valor
ADA x ID	0,871	0,00001
ADA x IF	-0,871	0,00001
ADA x Microporos	0,525	0,00409
ADA x Macroporos	0,746	0,00001
ADA x Pt	-0,433	0,02145
ADA x Ds	0,678	0,00007

Em azul: correlação positiva, em vermelho: correlação negativa.

Os resultados apresentados na tabela 9 sugerem que a ADA favorece os processos de degradação do solo, sendo que, a ADA apresentou correlação positiva com ID, microporos e densidade do solo. Neste caso, essa correlação é explicada pelo motivo de que, solos dispersos terão percolação de partículas de argila através da água, e isso leva que a porosidade natural seja obstruída pelas partículas de argila iluviadas, afetando a distribuição entre macro e microporos e aumentando a densidade do solo (KOCHHANN et al., 2000).

Concomitante a esse processo, forças mecânicas resultantes do tráfego intensivo de máquinas agrícolas nestes solos de ambientes de produção, promovem a aproximação de microagregados e das partículas de argila dispersa, aumentando a densidade do solo (CÂMARA e KLEIN, 2005), resultado esse corroborado pela forte correlação apresentada entre ADA e Densidade do Solo.

Por outro lado, a ADA apresentou correlação negativa com IF, Macroporos e Pt, sugerindo que solos com menor valor de ADA, estarão mais estruturados, com maior Índice de Floculação, distribuição adequada entre macro e microporos, resultando numa maior porosidade total. Spera et al. (2008), observou resultados parecido, em que, após aplicação de diferentes doses de calcário, foi observada aumento da ADA e diminuição do IF conforme as doses de calcário aumentavam.

Os atributos microbiológicos também exercem influência nos atributos físicos do solo, e neste trabalho essa correlação se evidenciou. Desta forma, estão apresentadas na tabela 10, as correlações de CBM e NBM, com macroporosidade, microporosidade, Pt, Ds, ADA, ID e IF.

**Tabela 10.** Correlação de Pearson e p-valor para Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) e Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM), com macroporosidade, microporosidade, Porosidade Total (Pt), Densidade do solo (Ds), Argila dispersa em Água (ADA), Índice de Floculação (IF) e Índice de Dispersão (ID).

<b>Atributos analisados</b>	<b>Correlação</b>	<b>p-valor</b>
CBM x Macroporosidade	0,91	0,00001
CBM x Microporosidade	-0,625	0,00038
CBM x Pt	0,551	0,00236
CBM x Ds	-0,916	0,00001
CBM x ID	-0,29	0,13493
CBM x IF	0,29	0,13493
CBM x ADA	-0,691	0,00005
NBM x Macroporosidade	0,678	0,00007
NBM x Microporosidade	-0,442	0,0185
NBM x Pt	0,447	0,01715
NBM x Ds	-0,742	0,00001
NBM x ID	0,09	0,64967
NBM x IF	-0,09	0,64967
NBM x ADA	-0,317	0,10077

Em azul: correlação positiva, em vermelho: correlação negativa.

Os atributos microbiológicos CBM e NBM apresentaram correlações positivas com macroporosidade, Pt e IF, e correlação negativa com microporosidade, Ds, ID e ADA. Esses resultados reforçam a influência dos microrganismos sobre os atributos físicos do solo, uma vez que, o CBM representa a quantidade de carbono imobilizado no solo pelos microrganismos, e o NBM a quantidade de nitrogênio presente nestes microrganismos. Desta forma, esses resultados sugerem que solos com uma microbiota mais ativa e abundante, terá como consequência, uma melhor qualidade dos atributos químicos do solo.

Nesta linha, usos do solo com práticas conservacionistas são imprescindíveis para uma agricultura mais sustentável, pois, ao estabelecer a correlação entre os atributos químicos, físicos e biológicos, ficou evidente como um atributo exerce influência sobre o outro. Assim, usos mais intensos do solo, ao promover a degradação apenas de um grupo de atributos, pode levar como consequência a degradação de demais indicadores da qualidade do solo. Solos manejados adequadamente, levarão a um melhor equilíbrio na qualidade química, física e biológica do solo.

#### 4.6 CONCLUSÃO

Os diferentes usos exercem influência sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. A área de lavoura apresentou resultados que indicam degradação dos atributos químicos, em relação aos demais usos. Áreas de floresta, onde a vegetação original é mantida apresentam equilíbrio químico mais adequado quando comparado às demais áreas, apresentando melhores valores de pH, V%, P, SB e CTC. A área de lavoura consorciada com *Uruchloa ruzizienis* apresentou-se como boa opção para o acúmulo de carbono e MO no solo, uma vez que na profundidade de 10-20 cm, apresentou maior resultado.

Os indicadores microbiológicos apresentaram melhores resultados na área de floresta, e decresceram conforme a intensidade do uso do solo foi aumentando, indicando que, quanto maior a perturbação do solo, maior será a degradação da sua qualidade biológica. O  $qCO_2$  foi maior na área de lavoura, o que sinaliza estresse da microbiota do solo devido ao manejo mais intenso.

A área de lavoura apresentou o maior valor de ADA em superfície, indicando um ambiente mais suscetível a processos de degradação como erosão e compactação. A área de floresta foi a única que apresentou distribuição equilibrada entre macro e microporos, resultando também no menor valor de Ds nas duas profundidades estudadas.

Em consequência da menor perturbação do solo, a área de floresta também se destacou com maior índice de estabilidade de agregados nas duas profundidades, e esse índice diminuiu conforme o aumento da intensidade do uso do solo, sendo que o menor valor observado foi encontrado na área de lavoura.

Os atributos do solo exercem correlações entre si, uma vez que pH, Ca e Al influenciaram nos resultados da ADA, IF e ID, quanto maior os valores de pH e Ca, maior foi a dispersão do solo, e a floculação aumentou à medida que os valores de Ca diminuíram e aumentaram de Al. A ADA influenciou na distribuição entre macro e microporos, Ds, dispersão e floculação, confirmando que solos com argila mais dispersa tendem a ser degradados mais facilmente.

Os indicadores microbiológicos também influenciaram na qualidade física do solo, uma vez que, nas áreas com maiores teores de CBM e NBM, o solo apresentou uma porosidade mais adequada, melhor distribuição entre macro e microporos, menor valor de ADA e menor Ds.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade do solo pode ser avaliada por meio dos indicadores físicos, químicos e biológicos, e fica evidente a inter-relação existente entre eles, uma vez que, quando um é alterado, haverá também modificações nos demais. Quando se busca manutenção desta qualidade, o uso do solo é quem mais exercerá influência, pois, quanto maior a intensidade do uso, maior será a degradação do solo.

Os resultados apresentados validam a hipótese deste estudo de que diferentes usos e manejos têm impactos significativos na qualidade do solo, e quanto maior a intensidade do uso maior será a influência sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

Com os resultados encontrados neste estudo, fica evidente a importância do manejo conservacionista, uma vez que, a área de floresta apresentou indicadores de qualidade física, química e biológica do solo mais próximos dos ideais. Por outro lado, as áreas com culturas anuais sem rotação de culturas apresentaram uma maior degradação do solo.

Portanto, é importante incorporar nos sistemas agrícolas produtivos, práticas conservacionistas que promovam a melhoria da estrutura do solo, que agreguem resíduos orgânicos e aumentem a diversidade microbiana do solo. Desta forma, estudos que busquem entender a dinâmica das atividades agropecuárias e sua influência nos atributos do solo, são constantemente necessários para que se busque sempre manejos que promovam a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

## 6. REFERÊNCIAS

ALAVAISHA, E.; MANZONI, S.; LINDBORG, R. Different agricultural practices affect soil carbon, nitrogen and phosphorous in Kilombero-Tanzania. **Journal of Environmental Management**, v. 234, p. 159-166, 2019.

ALMEIDA, A. T.; SIMÕES, K. S.; ALMEIDA, J. R. C.; PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. Qualidade biológica do solo em sistema de policultivo no semiárido da Bahia. **Ciência Agrícola**, v. 15, n. 2, p. 75-81, 2017b.

ALMEIDA, B. G. d.; FREITAS, P. L. d.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K.; BRIVALDO GOMES DE ALMEIDA, U. P. L. D. F. **Porosidade**. In book: Manual de métodos de análise de solos. Embrapa Solos, pp. 66-76, 2017a.

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**, 51, 1539-1547, 2016.

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, R. L. Integrating a complex rotation with no-till improves weed management in organic farming: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, p. 967-974, 2015.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) 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**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.

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.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, 2004.

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**, 2023.

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>.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazonica**, v. 41, p. 103-114, 2011.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, 2007.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.

ARMAS-HERRERA, C. M.; ACEVEDO-SANDOVAL, O. A.; CRUZ-MALAGÓN, R. A.; MORALES-PAYAN, J. P.; MEZA-HERNÁNDEZ, J. S. Effects of land use change on aggregation, organic carbon and stability in tropical soils. **Catena**, v. 177, p. 131-138, 2019.

ASMAR JÚNIOR, J. Utilização dos atributos químicos como indicadores da qualidade do solo na bacia hidrográfica do Rio das Almas na região de goianésia, estado de Goiás. 2019. 69 f. Dissertação (Mestrado em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente) - Centro Universitário de Anápolis. <http://repositorio.aee.edu.br/handle/aee/2967>.

ASSOULINE, S. ; TAVARES-FILHO, J. ; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties : experimental results and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v.6, n.2, p.390-398, Mar. 1997.

AYALA, L. M.; VAN EUPEN, M.; ZHANG, G.; PÉREZ-SOBA, M.; MARTORANO, L.; LISBOA, L. S.; BELTRÃO, N. E. S. Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. **The Science of the Total Environment**, v. 569-570, p. 1159-1173, 2016.

BALOTA, E. L.; MACHINESKI, O.; HAMID, K. I. A.; YADA, I. F.U.; BARBOSA G. M. C.; NAKATANI, A. S. et al. Soil microbial properties after long-term swine slurry application to conventional and no-tillage systems in Brazil. **SciTot. Environ.**, v. 490, p. 397-404, 2014.

BARRETO, A. C. et al. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1471-1478, 2008.

BHADURI, D.; PURAKAYASTHA, T.; PATRA, A.; SINGH, M.; WILSON, B. Biological indicators of soil quality in a long-term rice-wheat system on the Indo-Gangetic plain: combined effect of tillage-water-nutrient management. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, p. 1-14, 2017.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. Métodos de análise química de plantas. Campinas, Instituto Agrônomo, p. 48, Boletim Técnico, 78, 1983.

BATEY, T. Soil compaction and soil management – a review. **Soil Use and Management**, v. 25, n. 4, p. 335-345, 2009.

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>.

BORGHI E.; CRUSCIOL C.A.C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 163–71, 2007.

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.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKSEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, 120:105-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

BRADY, N.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716 p.

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

BROOKES, P.C.; LANDMAN, A.; PRUDEN, G.; JENKINSON, D. S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 17, p. 837-842, 1985.

CAIRES, E. F. **Controle da Acidez do Solo no sistema plantio direto**. IPNI - International Plant Nutrition Institute, Ponta Grossa, p. 27, 2013.

CALEGARI, A. DE CASTRO FILHO, C. TAVARES FILHO, J. RALISCH, R. GUIMARÃES, M. F. Melhoria da agregação do solo através do sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 27, n. 2, p. 147-157, 2006.

CANELLAS L. P. ; A. C. X. VELLOSO; C. R. MARCIANO; J. F. G. P. RAMALHO; V. M. RUMJANEK; C. E. REZENDE; G. A. SANTOS. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 935-944, 2003.

CARDOSO, J. A. F.; LIMA, A. M. N.; CUNHA, T. J. F.; RODRIGUES, M. S.; HERNANI, L. C.; AMARAL, A. J.; OLIVEIRA NETO, M. B. Organic matter fractions in a Quartzipsamment under cultivation of irrigated mango in the Lower São Francisco Valley region, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, p. 1068-1078, 2015.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A.; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M.; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274–289, 2013.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. F.; FREITAS, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 613-622, 2011.

CARDOSO, E. SILVA, M. L. N. MOREIRA, F. M. S CURTI, N. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, p. 631-637, 2009.

CÂMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:789-796, 2005.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e desenvolvimento das plantas. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132 p.

CARVALHO, F; MOREIRA, F. M. S; CARDOSO, E. J. B. Chemical and biochemical properties of *Araucaria angustifolia* (Bert.) Ktze. forest soils in the state of São Paulo. **Rev. Bras. Ciên. Solo**, Lavras, v. 36, n. 4, p. 1189-1202, 2012.

CASTILHO, S. C. de P.; COOPER, M.; DOMÍNGUEZ, A.; BEDANO, J. C. Effect of Land Use Changes in Eastern Amazonia on Soil Chemical, Physical, and Biological Attributes. **Soil Science**, v. 181, p. 133-147, 2016.

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>.

CARLOS, L.; VENTURIN, N.; MACEDO, R. L. G.; HIGASHIKAWA, E. M.; GARCIA, M. B.; FARIAS, E. S.; Crescimento e nutrição mineral de mudas de pequi sob efeito da omissão de nutrientes. **Ciência Florestal**, v. 24, n.1, p. 13-21, 2014.

CHEN, X.; ZHANG, H.; YAO, X.; ZENG, W.; WANG, W. Latitudinal and depth patterns of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in grasslands of an agro-pastoral ecotone. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 10, p. 3833-3846, 2021.

CHERUBIN, M.; KARLEN, D.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C.; DAVIES, C.; CERRI, C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016.

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, p. 4859-4876, 2004.

COBRA, R. L.; SILVA, R.; OLIVEIRA, G. F. A. D.; MIRANDA, D. L.; LEONARDO, F. A.; SILVA, M. L. Geoprocessamento aplicado ao levantamento e avaliação de solos: proposta de avaliação de terras para fins agrícolas no Município de Inconfidentes – MG. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 12, n. 2, p. 397–411, 2019.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; JÚNIOR, G. B. M. **Integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. Caderno de Ciências e Tecnologia**, v. 32, n. 1/2., 2015.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Rev.Bras. de Ciên. do Solo**, v. 32, p. 323-332, 2008.

COSTA, O. V. **Estoque de carbono e indicadores de qualidade de solo de tabuleiro sob pastagem no sul da Bahia**. 2005. 64 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

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, p. 0-0, 2017.

COUTINHO, F. S. **Atributos edáficos e qualidade do solo em áreas de agricultura, pastagem e fragmentos florestais na região do médio vale do Paraíba do Sul-Rio de Janeiro**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

COUTINHO, F. S.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; RODRIGUES TORRES, J. L. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata Scientiae**, v. 1, p. 100-105, 2010.

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>.

DALPOSSO, D. M.; BRUN, E. J.; SCHROEDER, F.; CANONICO, C. M.; MACEDO, V. Qualidade física do solo sob sistema silvipastoril com *Peltophorum dubium* e *Panicum maximum* cv. Aruana. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020.

DA SILVA, D. R. OLIVEIRA, F. P. DA 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.

DAVIDSON, E. A. SELVAGEM, K. BOLSTAD, P. CLARK, D. A. CURTIS, P. S. ELLSWORTH, D. S. HANSON, P. J. BE, L. LUO, Y. PREGAÇÃO, K. S. RANDOLPH, J. C. ZAK, D. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1-4, p. 39-51, 2002.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 1180-1186, 2012.

D'ANDRÉA, 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.

DE ARAÚJO, T. M. S.; BASTOS, F. de H. Corredores Ecológicos e Conservação da Biodiversidade: Aportes Teóricos e Conceituais. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, v. 21, n. 2, p. 716-729, 2019.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 703-709, 1999.

DERPSCH, R. FRIEDRICH, T. KASSAM, A. HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, p. 1-25, 2010.

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N. KOPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH / Londrina: IAPAR, 272 p. Il. 1991.

DICK, D.; GONÇALVES, C.; DALMOLIN, R.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; SIMÕES, M.; NETO, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. **Geoderma**, v. 124, p. 319-333, 2005.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, n. 1, p. 3-11, 2000.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. **Methods for assessing soil quality**, v. 49, p. 25-37, 1997.

DORAN, J.W., & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. & Stewart, B.A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, p.1-20, 35, 1994.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PINHEIRO, E. F. M.; VALLADARES, G. S. Substâncias húmicas e relação com atributos edáficos. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 157-165, 2011.

EBENSO, B.; OTU, A.; GIUSTI, A.; COUSIN, P.; ADETIMIRIN, V.; RAZAFINDRALAMBO, H.; EFFA, E.; GKISAKIS, V.; THIARÉ, O.; LEVAVASSEUR, V.; KOUHOUNDE, S.; ADÉOTI, K.; RAHIM, A.; MOUNIR, M. Nature-based One Health approaches to urban agriculture can deliver food and nutrition security. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 2022.

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, p. 610-621, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.09.011>.

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.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. ver. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **Resolution adopted by the General Assembly on 20 December 2013**. United Nations A/RES/68/232. Rome: United Nations, 2014.

FALCÃO, K. D. S.; MONTEIRO, F. D. N.; OZÓRIO, J. M. B.; SOUZA, C. B. S.; FARIAS, P. G. D. S.; MENEZES, R. D. S.; PANACHUKI, E.; ROSSET, J. Estoque de carbono e agregação do solo sob diferentes sistemas de uso no cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 55, n. 2, p. 242-255, 2020.

FAUCI, M.; DICK, R. **Microbial biomass as an indicator of soil quality**: effects of long-term management and recent soil amendments. In: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, v. 35, 2015.

FERNANDES, E. C. M. The impact of selective logging and forest conversion for subsistence agriculture and pastures terrestrial nutrient dynamics in the Amazon. **Ciência e Cultura**, v. 49, n. 1/2, p. 34-47, 1997.

FERREIRA, G. B.; SILVA, M. S. L.; GAVA, C. A. T.; SALVIANO, A. M.; MOREIRA, M. M. Carbono da biomassa microbiana e respiração basal em solos com barragens subterrâneas no semiárido paraibano. In: **IX CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA**, Belém, 2015.

FERREIRA, A. C. C.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; EISENHAUER, N. Land-use type effects on soil organic carbon and microbial properties in a semi-arid region of Northeast Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 25, p. 155-168, 2014.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Eds. Marco Antônio Ferreira Gomes, and Manoel Dornelas de Souza. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R.; OLIVEIRA, G. C.; BALBINO, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de latossolo vermelho distrófico de cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 1, p. 22-30, 2007.

FONTES, M.P.F.; CAMARGO, O.A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v.58, n.3, p. 627-646, 2001.

FRANÇA, L. C. de J.; OLIVEIRA, R. J. de; RIBEIRO, N. M. A. R.; SANTOS, E. L.; NORONHA, F. C. C.; RIBEIRO, A. T. Caracterização da Cobertura Vegetal e Uso do Solo no Município de Uruçuí, Piauí, Brasil. **Nativa**, v. 5, n. 5, p. 337-341, 2017.

FRANCISCO, R. M.; SOUZA, A. L. S.; OLIVEIRA, T. R. Mapeamento da aptidão edáfica para fruticultura segundo o zoneamento agropecuário do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia física**, Recife, v. 8, n. 2, p. 377-390, 2015.

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, v. 26, p. 08-25, 2017.

FREITAS, P. L.; LANDERS, J. N. The transformation of agriculture in Brazil through development and adoption of zero tillage conservation agriculture. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 2, n. 1, p. 35-46, 2014.

FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; JÚNIOR, D. S.; MELO, T.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 208, p. 104877, 2021.

GAMA-RODRIGUES, E.F. da; GAMA-RODRIGUES, A.C. da; PAULINO, G.M.; FRANCO, A.A. Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no norte do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1521-1530, 2008.

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.

GASSEN, D. N.; GASSEN, F. R. **Plantio direto: o caminho do futuro**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 207 p., 1996.

GAI, X.; WANG, H.; LIU, J.; ZHAI, L.; LIU, S.; REN, T.; LIU, H. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. **PLoS ONE**, v. 9, n. 12, p. 1– 19, 2014.

GRIMBLATT, V. **The challenge of agriculture: increase the productivity in a sustainable way**. *Forum on Specification & Design Languages*, p. 1-6, 2021.

GUERRA, A.; FULLEN, M.; JORGE, M.; ALEXANDRE, S. **Soil erosion and conservation in Brazil**. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 37, p. 81-91, 2014.

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**, 36(2), 693–704, 2015. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p693>.

GEISEN, S. BRIONES, M. J. GAN, H. BEHAN-PELLETIER, V. M. FRIMAN, V. P. GROOT, G. A. HANNULA, S. E. LINDO, Z. PHILIPPOT, L. TIUNOV, A. V. WALL, D. H. A methodological framework to embrace soil biodiversity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 136, artigo 107536, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107536>.

GÖMÖRYOVÁ, E. BARANČÍKOVÁ, G. TABIASOVÁ, E. HALÁS, J. SKALSKÝ, R. KOCO, S. GÖMÖRY, D. Responses of soil microorganisms to land use in different soil types along the soil profiles. **Soil and Water Research**, 2020. <https://doi.org/10.17221/20/2019-SWR>.

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 3, p. 390-399, 2016.

IBRAHIM, M. M.; ALIYU, J. Comparison of methods for saturated hydraulic conductivity determination: field, laboratory and empirical measurements (a preview). **British Journal of Applied Science & Technology**, v. 15, n. 3, p. 1-8, 2016.

HEGER, T. J.; IMFELD, G.; MITCHELL, E. A. D. Special issue on “Bioindication in soil ecosystems”: Editorial note. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v. 49, p. 1–4, 2012.

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.

HORN, R.; TAUBNER, H.; WUTTKE, M. Soil physical properties related to soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 30, n. 2-4, p. 187-216, 1994.

HUANG, N. WANG, L., XIAO-PENG SONG, T. ANDREW BLACK, RACHHPAL S. JASSAL, RANGA B. MYNENI, CHAOYANG WU, LEI WANG, WANJUAN SONG, DABIN JI, SHANSHAN YU, ZHENG NIU. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. **Science Advances**, v. 6, n. 41, 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.

INSAM, H.; HASELWANDTER, K. Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. **Oecologia**, v.79, n.2, p.174-178, 1989.

JAKELAITIS, A. SILVA, A. A. SANTOS, J. B. VIVIAN, R. . Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 2, p. 118-127, 2008.

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.

JUCKSCH, I. **Calagem e dispersão de argila em amostras de um Latossolo Vermelho Escuro**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, p.37, Diss. Tese de Mestrado, 1987.

KARLEN, D. L., De, M., MCDANIEL, M.D., & STOTT, D.E. Evolution of the Soil Health Movement. In: Douglas L. K., Stott, D. E. Stott, & Mikha, M.M. (eds.) **Soil Health Series: Volume 1 Approaches to Soil Health Analysis**. Madison: SSSA, p. 21-48, 2021.

KARLEN, D.L., MAUSBACH, M.J., DORAN, J.W., CLINE, R.G., HARRIS, R.F., & SCHUMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). (1997). **Soil Science Society of American Journal**, 61, 4-10.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. **A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality**, 1994.

KAZMIERCZAK, R. **Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistemas de preparo**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2018.

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.

KHEYRODIN, H; GHAZVINIAN, K; TAHERIAN, M. Tillage and manure effect on soil microbial biomass and respiration, and on enzyme activities. **Afric. Jour. of Biotech.**, [s. l.], v. 11, n. 81, p. 14652-14659, 2012.

KENNEDY, A.C., SMITH, K.L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. **Plant Soil**, v. 170, p. 75–86. 1995.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. & BERTON, A.L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo, Embrapa Trigo, 20p. (Embrapa Trigo. Documentos, 19), 2000.

KOEPPEL, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, p. 478, 1948.

LAISHRAM, J.; SAXENA, K.; MAIKHURI, R.; RAO, K. Soil quality and soil health: A review. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, v. 38, 2012.

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.; PIERCE, F. J. **Soil management for sustainability**. Soil and Water Conservation Society, 189p, 1991.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LAZZARETTI, G.; MATSUOKA, M.; BETTIO, I.; PAVEGLIO, S.; SHALLEMBERGER, J.; SOMAVILLA, L. Impacto de diferentes sistemas agrícolas e florestais na qualidade química e biológica do solo de uma propriedade rural. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 4, p. 330-350, 2019.

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.

LEE, J. W.; KIDDER, M.; EVANS, B. R.; PAIK, S.; BUCHANAN III, A. C.; GARTEN, C. T.; BROWN, R. C. Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment. **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 20, p. 7970–7974, 2010.

LEPSCH, I. F. 19 lições de Pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LI, Q.; XU, M.; LIU, G.; ZHAO, Y.; TUO, D. Cumulative effects of a 17-year chemical fertilization on the soil quality of cropping system in the Loess Hilly Region, China. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 2, p. 249-259, 2013.

LIMA FILHO, O. F. DE; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática.** Brasília: Embrapa, 2014.

LIRA, R. A.; BEZERRA DE ARAÚJO, M. S.; ALMEIDA, B. G. D.; MARCELO, V. F. **Uso agrícola e atributos físico-hídricos de solo coeso.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 7, 2016.

LIU, S. L.; LI, Y.; WU, J.; HUANG, D. Y.; SU, Y.; WEI, W. X. Spatial variability of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in a hilly red soil landscape in subtropical China. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 56, n. 5, p. 693-704, 2010.

LIU, Y.; WANG, P.; DING, Y.; LU, H.; LI, L.; CHENG, K.; ZHENG, J.; FILLEY, T.; ZHANG, X.; ZHENG, J.; PAN, G. Microbial activity promoted with organic carbon accumulation in macroaggregates of paddy soils under long-term rice cultivation. *Biogeosciences*, v. 13, p. 6565-6576, 2016.

LIU, Z.-F.; FU, B.-J., LIU, G.-H.; ZHU, Y.-G. Soil quality: concept, indicators and its assessment. *Acta Ecologica Sinica*, v. 6, p. 901-913, 2006.

LOPES, R. D.; VEZZANI, F. M.; PARAGUAIO, E. V. Abordagem da Qualidade do Solo nos trabalhos publicados no Brasil. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 11, n. 1, 2023.

LOPES, A.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. **Fertilidade do solo**, p. 1-12, 2007.

LORENZETTI, J. RODRIGUES, M. A. SOARES, A. P. VIEIRA, C. R. Densidade de plantas e os efeitos nas características agrônômicas, temperatura e umidade do solo em consórcio milho-braquiária. *Nativa*, Sinop, v. 11, n. 1, p. 101-107, Pesquisas Agrárias e Ambientais, 2023.

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, n. 1, p. 175-187, 2004.

LOZADA, C. M. Índice de qualidade do solo para a avaliação do impacto de diferentes usos e manejos e sua aplicação em uma área rural de Planaltina (DF). 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/18739>

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. *Revista de Ciências Agroambientais*, v. 9, p. 09-19, 2010.

MACHADO, L. V.; RANGEL, O. J. P.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, R. V.; FERRARI, J. L. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Coffee Science*, v. 9, p. 289-299, 2014.

MADARI, B. E. **Fracionamento de agregados: procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, ISSN 1517-5685, 2004.

MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J. R. R. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 174p., 2002.

MARCHIORI JÚNIOR, M; MELO, W.J. de. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesq. Agrop. Bras.**, v.35, p.1177-82, 2000.

MARCHIORI JUNIOR, M.; MELO, W. J. Carbono: carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática de um solo sob mata natural, pastagem e cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 257-263, 1999.

MATOSO, S. C. G.; LIMA, R. I. M. P.; MACHADO, J.; SILVA, R. P. Potencial agrícola dos solos e dinâmicas territoriais da Amazônia Ocidental Brasileira. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, 2015.

MARIN, A. M. P. **Impactos de um sistema agroflorestal com café na qualidade do solo**. 83f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2002.

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.

MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1381p., 2019.

MELLONI, R; PERREIRA, E. G. M; ALVARENGA, M. I. N. Indicadores da qualidade do solo. **Informe agropecuário**, v.29, n 244, maio/junho. Belo Horizonte. p.17-29. 2008.

MERCANTE, F. M. SILVA, R. F. da. FRANCELINO, C. S. F. CAVALHEIRO, J. C. T. OTSUBO, A. A. Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 34, n. 4, p. 479-485, 2008. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i4.5301>.

MERLIN, A.; ROSOLEM, C.; HE, Z. Non-labile phosphorus acquisition by Brachiaria. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, p. 1319-1327, 2016. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109117>.

MERLOTI, L. F.; BOSSOLANI, J. W.; MENDES, L. W.; TSAI, S. M.; et al. Investigating the effects of Brachiaria (Syn. Urochloa) varieties on soil properties and microbiome. **Research Square**, 2023.

MERTEN, G.; MINELLA, J. The expansion of Brazilian agriculture: Soil erosion scenarios. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 1, p. 37-48, 2013.

MOEBIUS-CLUNE, B. N.; VAN ES, H.; SCHINDELBECK, R.; IDOWU, O. J.; CLUNE, D. J.; THIES, J. Evaluation of laboratory-measured soil properties as indicators of soil physical quality. *Soil Science*, v. 172, n. 12, p. 895-912, 2007.

MORAES, L.; MELO, T.; TAVARES FILHO, J. Impact of sugarcane reform system in sandy soils on organic carbon and soil chemical attributes. *Sugar Tech*, v. 25, n. 7367, 2023.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 625 p, 2002.

MORATELLI, F. A.; ALVES, M. A. B.; BORELLA, D.; KRAESKI, A.; ALMEIDA, F. T.; ZOLIN, C. A.; HOSHIKE, A. K.; SOUZA, A. P. Effects of Land Use on Soil Physical-Hydric Attributes in Two Watersheds in the Southern Amazon, Brazil. *Soil Systems*, 2023.

MORELLI, M.; FERREIRA, E.B. Efeito do carbonato de cálcio e do fosfato diamônico em propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.11, p. 1-6, 1987.

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

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS ONE*, v. 9, n. 8, 2014.

MURRELL, E. G. **Challenges and opportunities in managing pests in no-till farming systems**. In: *No-Till Farming Systems for Sustainable Agriculture*, Springer, p. 127-140, 2020.

NAIR, P.K.R. et al. Nutrient cycling in tropical agroforestry systems: myths and science. In: BUCK, L.E.; LASSOIE, J.P.; FERNANDES, E.C.M. (Eds). *Agroforestry in sustainable agricultural systems*. **Advances in agroecology Washington, D.C.**: CRC Press, p. 1-31. 1999.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P. de; SILVA, J. R. M. da; PAULINO, L. A. Total organic carbon stock and granulometric fractioning of organic matter in soil use systems in Cerrado. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, v. 18, n. 1, p. 136–145, 2019. DOI: 10.5965/223811711812019136.

NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Impacto e modelagem da compactação do solo. Uma revisão. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 33, p. 291-309, 2013.

NEUMANN, M. G.; GESSNER, F.; CIONE, A. P. P.; SARTORI, R. A.; CAVALHEIRO, C. C. S. Interações Entre Corantes e Argilas em Suspensão Aquosa. **Química Nova**, v.23, n.6, p. 818-824, Mar.2000.

NIJMEIJER, A. LAURI, P. E. HARMAND, J. M. SAJ, S. Carbon dynamics in cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: afforestation of savannah as a sequestration opportunity. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 3, p. 851-868, 2019.

NOVAES, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds.) Fertilidade do solo. Fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.375-470, 2007.

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; TOMAZI, M.; GOMES, A. C. C. O.; PIANA, P. A. Biomassa e atividade microbiana do solo sob diferentes coberturas vegetais em região Cerrado-Mata Atlântica. **Revista Agroambiental**, v. 15, n. 3, e8780, 2022.

OKA-FIORI, C.; FIORI, A. P.; HASUI, Y. Dinâmica da Ocupação do Solo da Bacia do Rio Itiquira, Mato Grosso, Brasil. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 7, 2003.

OLIVEIRA SILVA, M. de; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L. do; OLIVEIRA, J. de; PEREIRA, D. de F.; SILVA COSTA, K. D. da. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838–47855, 2020.

OLIVEIRA FILHO, L. C. I. SCHNEIDER, L. F. TELES, J. S. WERTER, S. D. SANTOS, J. C. P. Fauna edáfica em áreas com diferentes manejos e tempos de descarte de resíduos animais. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 113-123, 2018.

OLIVEIRA, W. N.; FERREIRA, N. C. Avaliação Multitemporal do Uso e Cobertura do Solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite Utilizando Imagens Landsat-5. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 38, p. 46-62, 2015.

ORGIAZZI, A., BARDGETT, R.D., BARRIOS, E., BEHAN-PELLETIER, V., BRIONES, M.J.I., CHOTTE, J-L., DE DEYN, G.B., EGGLETON, P., FIERER, N., FRASER, T., HEDLUND, K., JEFFERY, S., JOHNSON, N.C., JONES, A., KANDELER, E., KANEKO, N., LAVELLE, P., LEMANCEAU, P., MIKO, L., MONTANARELLA, L., MOREIRA, F.M.S., RAMIREZ, K.S., SCHEU, S., SINGH, B.K., SIX, J., VAN DER PUTTEN, W.H., WALL, D.H. (Eds.). **Global Soil Biodiversity Atlas**. Luxembourg: European Commission, Publications Office of the European Union. 2016.

OYEDELE, A.; OLAYUNGBO, A.; DENTON, O.; OGUNREWO, O. M.; MOMODU, F. Assessment of the microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in relation to physico-chemical properties of Acric Luvisols in Ibadan South West, Nigeria. **Journal of Agriculture and Environment for International Development**, v. 109, n. 2, p. 179-187, 2015.

PARANHOS FILHO, A.; FIORI, A.; DISPERATI, L.; LUCCHESI, C.; CIALI, C.; LASTORIA, G. Avaliação multitemporal das perdas de solos na bacia do rio Taquarizinho-MS. **Boletim Paranaense de Geociências**. v. 52, 2004.

PAREDES JUNIOR, F. P. P.; PORTILHO, I. I. R.; MERCANTE, F. M. Microbiological attributes of the soil under cultivation of sugarcane with and without burning straw. **Semina: Ciên. Agrár.**, Londrina, v. 36, n. 1, p. 151-164, jan. 2015.

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>.

PARKIN, T.B.; DORAN, J.W.; FRANCO-VIZCAINO, E. **Field and laboratory tests of soil respiration**. In: Doran, J.W. and Jones, A.J. Eds., *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication, Madison, 231-245, 1996.

PAVAN, M. A. BLOCH, M; F. ZEMPULSKI, H. C. MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, D. C. **Manual de Análise Química de Solo e Controle de Qualidade**. 1ª ed. Londrina: IAPAR, 1992. 40 p.

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, n.6, p.391-394, 1992.

PAVINATO, P. S. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PAULA, M. B.; ASSIS, R. P.; BAHIA, V. G. et al. 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. 18, p. 66-70, 1998.

PEGORARO, R. F.; MOREIRA, C. G.; DIAS, D. G.; SILVEIRA, T. C. Carbon and nitrogen stocks in the soil and humic substances of agricultural crops in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, p. 574-583, 2018.

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.

PEREIRA, A. E.; SILVA JUNIOR, O. L. da; SCHMIDT FILHO, E.; GASPAROTTO, F.; PACCOLA, E. A. de S. Uma revisão sistemática dos indicadores microbiológicos para avaliar a qualidade do solo agrícola. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 5, 2024.

PINHEIRO, A.; BERTOLDI, J.; VIBRANS, A. C.; KAUFMANN, V.; DESHAYES, M. Uso do solo na zona ripária de bacias agrícolas de pequeno a médio porte. **Revista Árvore**, v. 35, n. 6, p. 1245-1251, 2011.

PINTO, L. C.; MELLO, C.; NORTON, L.; SILVA, S. H.; TAVEIRA, L. R. S.; CURI, N. Land-use effect on hydopedology in a mountainous region of Southeastern Brazil. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 41, p. 413-427, 2017.

POLIZEL, S., VIEIRA, R., POMPEU, J., FERREIRA, Y., SOUSA-NETO, E., BARBOSA, A., & OMETTO, J. Analysing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado – MATOPIBA region (Brazil). **Land Use Policy**, v. 109, 2021.

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.

PRADO, H. do; PRADO, T. A. B. do. **Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais** – 6 ed., 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.

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.

RAIJ, B. van. **Mecanismos de interação entre solos e nutrientes**. In: **RAIJ, B. van., ed. Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1981. p. 17-31.

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.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 80, p. 1609-1623, 2007.

RAPHAEL, J. P. A.; CALONEGO, J. C.; MILORI, D. M. B. P.; ROZOLEM, C. A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 45-53, 2016.

RAUBER, L. P.; ANDRADE, A. P.; FRIEDERICHS, A.; MAFRA, Á. L.; BARETTA, D.; ROSA, M. G. DA; MAFRA, M. S. H.; CORREA, J. C. Soil physical indicators of management systems in traditional agricultural areas under manure application. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 4, p. 354–359, 2018.

R CORE TEAM. R: **A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023.

REDMILE-GORDON, M.; GREGORY, A. S.; WHITE, R. P.; WATTS, C. W. Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use. **Geoderma**, v. 363, p. 114-143, 2020.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PERAZA, J. E. S.; COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, p. 1-12, 2020.

REICOSKY, D. **No-till farming systems for sustaining soil health**. In: No-Till Farming Systems for Sustainable Agriculture, Springer, p. 619-631, 2020.

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

REINERT, D. J. REICHERT, J. M. SILVA, V. R. **Propriedades físicas dos solos em sistemas de plantio direto irrigado**. In: CARLESSO, RL; PETRY, M. T. ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria: Palloti, 156p. 2001.

REIS JÚNIOR, F. B. dos; MENDES, I. de C. **Biomassa microbiana do solo**. Embrapa Cerrados, Planaltina, 205, 40 p., 2007.

RIBEIRO, P. H.; DOS SANTOS, J. V. V. M.; COSER, S. M.; NOGUEIRA, N. O.; MARTINS, C. A. da 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.qvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/476>.

RIBON, A. A.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FERNANDES, K. L.; HERMÓGENES, V. T. L. Alterações na estabilidade de agregados de Latossolo e Argissolo em função do manejo, na entrelinha da seringueira (*Hevea brasiliensis*). **Revista Árvore**, v. 38, n. 6, p. 1065-1071, 2014.

ROBOREDO, D., MAIA; J. C. de S.; OLIVEIRA, O. J.; ROQUE, C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um latossolo vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.2, p. 307-314, 2010.

ROJAS, M. A.; VAN EERD, L. L.; O'HALLORAN, I. P.; SIKKEMA, P. H.; ROBINSON, D. E. Responses of spring-seeded cover crop roots by herbicide residues and short-term influence in soil aggregate stability and N cycling. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 98, p. 990-1004, 2018.

RUAMPS, L. S.; NUNAN, N.; CHENU, C. Microbial biogeography at the soil pore scale. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 280-286, 2011.

RUSINAMHODZI, L. **Managing crop rotations in no-till farming systems**. In: No-till farming systems for sustainable agriculture, p. 21-31, Springer, 2020.

SÁ, J.C.M. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto**. In: Soil fertility, soil biology, and plant nutrition interrelationships. Soc. Bras. Ci. Solo. UFLA, Lavras, pp. 267-320, 1999.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 11-21, 2008.

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**, [S. l.], p. 49–67, 2024.

SANTOS, S. V. dos; FERREIRA, E. de M.; GRIEBELER, N. P.; LEANDRO, W. M. Perdas de Solo e de Água em Diferentes Sistemas de Manejo em Latossolo Vermelho. **Nativa**, v. 7, n. 1, p. 64–69, 2019.

SANTOS, C. A. REZENDE, C. de P. PINHEIRO, E. 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.

SANTOS, P.S. *Ciência e Tecnologia de Argilas*, vol. 1, 2ª ed., São Paulo Edgar Blücher, 1992. p 35.

SAQIB, M.; AKHTAR, J.; QURESHI, R. H. Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil: I. Grain yield and yield components. **Soil and Tillage Research**, v. 77, n. 2, p. 169-177, 2004.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1369-1377, 2008.

SCHINDELBECK, R.; ES, H.; ABAWI, G.; WOLFE, D.; WHITLOW, T. L.; GUGINO, B.; IDOWU, O. J.; MOEBIUS-CLUNE, B. **Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management**. *Landscape and Urban Planning*, v. 88, n. 2-4, p. 73-80, 2008.

SENA, M. M. de; POPPI, R. J.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J. Avaliação do uso de métodos quimiométricos em análise de solos. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 547-556, 2000.

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, P.; SINGH, G.; SARKAR, S. K.; SINGH, R. P. Improving soil microbiology under rice-wheat crop rotation in Indo-Gangetic Plains by optimized resource management. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 3, p. 150, 2015.

SILVA, C. S. R. da; SILVA ARAÚJO, E. da; COSTA, L. S. No-till system organic vegetable production under green manure: effect on yield and soil properties. **Organic Agriculture**, v. 14, p. 231-244, 2024.

SILVA, D. R. DA, OLIVEIRA, F. P. DE, SILVA, P. L. F. DA, & MARTINS, A. F. Qualidade do solo sob diferentes condições de uso no semiárido Paraibano. **Revista Valore**, 8, 25–36, 2023. <https://doi.org/10.22408/reva802023114525-36>.

SILVA, F. S.; LEMGRUBER, J. F. S.; NUNES, G. S.; MONTEIRO, V. G.; GRAIA, M. dos S.; VENTUROSO, L. A. C. Atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo em Rondônia. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 9, p. 64710-64723, 2022.

SILVA, M. de O.; SANTOS, M. P. dos; SOUSA, A. C. da P.; SILVA, R. L. V. da; MOURA, I. A. A. de; SILVA, R. S. da; COSTA, K. D. da S. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021.

SILVA, T. A. C. **Indicadores da qualidade de solo na avaliação da condição ambiental de área de lixão desativado em Ouro Fino-MG**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Universidade Federal de Itajubá. 2019.

SILVA, A. P. da; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; RALISCH, R.; HUNGRIA, M.; GUIMARÃES, M. de F. 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.

SILVA, C. F. da.; PEREIRA, M. G.; MIGUEL, D. L.; FEITORA, J. C. F.; LOSS, A.; MENEZES, C. E. G.; SILVA, E. M. R. da. 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.

SILVA, A. P. et al. **Indicadores da qualidade física do solo**. In: VAN LIER, Q. de J. (Ed.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 241-280, 2010.

SILVA, L. G. da; MENDES, I. de C.; REIS JÚNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; MELO, J. T. de; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 613-620, 2009.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO<sub>2</sub>)**. Comunicado Técnico 99. Embrapa, 2007.

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

SIMON, C. da P.; VITÓRIA, E. L. da; LACERDA, E. das G.; AVANCINI, Y. S.; RODRIGUES, T. F.; SIMON, C. A. Emissão de CO<sub>2</sub>, atributos físicos e carbono orgânico total em diferentes sistemas de preparo do solo. **Nativa**, v. 7, n. 5, p. 494-499, 2019.

SMITH, H.J. et al. Biofilms on glacial surfaces: hotspots for biological activity. **NPJ Biofilms and Microbiomes**, v. 2, artigo 16008, 2016.

SPERA, S. T. DENARDIN, J. E. ESCOSTEGUY, P. A. V. DOS SANTOS, H. P. FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2613-2620, 2008.

SOBRAL, L. F. BARRETO, M. C. V. SILVA, A. J. DOS ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. 2015.

SOUZA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. **Acidez do solo e sua correção**. In: NOVAIS, R.F. et al. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um neossolo quartzarênico e um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 11, p. 1135-1139, 2005.

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.

STABILE, M.; GUIMARÃES, A. L.; SILVA, D. S.; RIBEIRO, V.; MACEDO, M.; COE, M.; PINTO, E.; MOUTINHO, P.; ALENCAR, A. Solving Brazil's land use puzzle: increasing production and slowing Amazon deforestation. **Land Use Policy**, v. 91, 2020.

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.

STÖCKER, C.M; MONTEIRO, A.B; BAMBERG, A.L; CARDOSO, J.H; MORSELLI, T.B.G.A; LIMA, A. C. R. **Bioindicadores da qualidade do solo em sistemas agroflorestais**. 14<sup>a</sup> Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa, 2017.

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

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. de 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.

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.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5), 1995.

TEIXEIRA, P. C. et al. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, p. 360-367, 2017.

TEIXEIRA, M. G. C.; AZEVEDO, L. Política Ambiental: uma abordagem analítica do desenho Político-Institucional para a sua Instrumentalização na gestão ambiental empresarial no Brasil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 3, n. 3, 137-154, 2009.

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.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, v. 22, n. 2, p. 301–309, 1998.

TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 4, p. 1447-1469, 2020.

URBAŃSKI, K.; JAKUBIAK, M. Impact of land use on soils microbial activity. **Journal of Water and Land Development**, v. 35, p. 249-257, 2017.

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.

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.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, v. 35, n. 1, p. 213–223, 2011.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

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.

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.

ZANINETTI, R; MOREIRA, A; MORAES, L. A. C. Physical, chemical, and biological attributes of a Xanthic Oxisol after forest conversion to rubber tree plantation in the Amazon. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1061-1068, set. 2016.

WEZEL, A.; CASAGRANDE, M.; CELETTE, F.; VIAN, J. F.; FERRER, A.; PEIGNÉ, J. Agroecological practices for sustainable agriculture: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 1, p. 1-20, 2014.

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.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil & Tillage Research**, v. 9, p. 510-519, 2007.

ZHAO, W.; EFREMOVA, N. Soil organic carbon estimation from climate-related features with graph neural network. **arXiv preprint arXiv:2311.15979**, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.15979>.

ZHENG, J.; ZHANG, X.; PAN, G.; LI, L. Diurnal variation of soil basal respiration and CO<sub>2</sub> emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilizations. **Journal of Plant Nutrition and Fertilizers**, v. 12, n. 4, p. 485-494. 2006.

ZIBILSKI, L. M. **Carbon mineralization**. In: WEAVER, R. W. et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: SSSA Book Series No. 5, SSSA and ASA, p. 835-863. 1994.

ZILLI, J. E. RUMJANEK, N. G. XAVIER, G. R. COUTINHO, H. L. da C. NEVES, M. C. P. Diversidade microbiana como indicador de qualidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 20, n. 3, p. 391-411, 2003.

ZOHRY, A.; OUDA, S. **Crop Rotation Defeats Pests and Weeds: An Approach to Secure Future Food**, Crop Rotation, p. 77-88, 2018.