

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar  
*Campus Sorocaba*

Jessica Gomes Siqueira de Oliveira

**Indicadores Visuais da Qualidade do Solo: Subsídios para um Guia  
Prático ao Agricultor Familiar**

Sorocaba (SP)

2025

# **Indicadores Visuais da Qualidade do Solo: Subsídios para um Guia Prático ao Agricultor Familiar**

Jessica Gomes Siqueira de Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão em Sustentabilidade Ambiental para obtenção do título de mestre em Gestão em Sustentabilidade Ambiental da Universidade Federal de São Carlos. Área de concentração: qualidade do solo.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Barboza da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Melloni

Sorocaba (SP)

2025

Oliveira, Jessica Gomes Siqueira de.

Indicadores Visuais da Qualidade do Solo: Subsídios para um Guia Prático ao Agricultor Familiar / Jessica Gomes Siqueira de Oliveira - 2025.

114f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Reginaldo Barboza da Silva

Banca Examinadora: Flávio Gabriel Bianchini, Leandro José Grava de Godoy

Bibliografia

1. Qualidade do solo. 2. Indicadores visuais de qualidade do solo. I. Oliveira, Jessica Gomes Siqueira de. II. Avaliação de indicadores visuais do solo.

Jessica Gomes Siqueira de Oliveira

**Indicadores Visuais da Qualidade do Solo: Subsídios para um Guia Prático ao  
Agricultor Familiar**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão em Sustentabilidade Ambiental para obtenção do título de mestre em Gestão em Sustentabilidade Ambiental da Universidade Federal de São Carlos. Área de concentração: qualidade do solo.

Sorocaba, 17 de dezembro de 2025

---

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Barboza da Silva

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Unesp – Vila Tupy

Examinador

---

Dr. Flávio Gabriel Bianchini

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar – Lagoa do Sino

Examinador

---

Dr. Leandro José Grava de Godoy

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Unesp – Vila Tupy

## DEDICATÓRIA

Ao meu Deus, Pai das luzes, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por todo amparo e presença maravilhosa.

À minha mãe, Neusinha, por ter acreditado em mim, sempre incentivar meus estudos e jamais ter desistido de guerrear.

Ao professor Reginaldo Barboza, pelo apoio técnico. Ao professor Rogério Melloni, por todo incentivo, pelos aprendizados e por acreditar no propósito extensionista desta pesquisa como promotora de desenvolvimento rural sustentável.

Ao meu amigo Fernando, pela companhia no mestrado e na vida musical. Às minhas amigas Fernanda e Laura, que tornaram essa jornada mais leve.

À equipe do laboratório, em especial ao Dr. Leandro Godoy pelo suporte e ao Dr. Heitor Marcel por todo aprendizado e ajuda. À UFSCar, por mais uma oportunidade de estudo.

Ao meu amigo Donizete, que acreditou sempre em meu trabalho como engenheira agrônoma e forneceu todo o suporte para realização deste estudo. Aos produtores rurais Hélio e Valdison, pela confiança em meu trabalho e por acreditarem nos indicadores visuais de qualidade do solo, permitindo uma parceria de longa data e relação de confiança produtor-extensionista.

Ao Departamento Municipal de Agricultura de Araçoiaba da Serra, em especial aos senhores Joam e Gabriela, pela oportunidade de realização deste mestrado.

À minha avó Francisca e meu avô Roque, por cultivarem em mim o amor à terra desde o princípio.

*(...) O homem é o que a terra ou se quiser  
o solo, faz dele (...).*

Ana Maria Primavesi

## RESUMO

OLIVEIRA, Jessica Gomes Siqueira de. Indicadores Visuais da Qualidade do Solo: Subsídios para um Guia Prático ao Agricultor Familiar. 2025. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Gestão na Sustentabilidade Ambiental – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2025.

A qualidade do solo é essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas e para a manutenção de sistemas produtivos, sendo diretamente influenciada pelo uso e manejo. Indicadores visuais têm se destacado como ferramentas práticas, acessíveis e de baixo custo, fornecendo diagnósticos rápidos sobre as condições físicas, químicas e biológicas do solo. Este estudo teve como objetivo selecionar e avaliar a sensibilidade desses indicadores sob diferentes tipos de uso ou manejo da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê e organizar as informações em um guia prático voltado à agricultura familiar. Foram examinados três ambientes com distintos pressões de uso — mata nativa (MT), sistema agroflorestal agroecológico (SAF) e pastagem degradada (PAST) — situados no município de Araçoiaba da Serra (SP). A análise visual considerou indicadores como cor e odor, compactação, infiltração, desenvolvimento radicular, susceptibilidade à erosão, presença de macrofauna e serapilheira, pedregosidade, cobertura do solo e efervescência em peróxido de hidrogênio. Os resultados demonstraram que os indicadores visuais respondem de forma clara às diferenças entre os sistemas avaliados, apresentando forte complementaridade com as análises laboratoriais, sobretudo aquelas relacionadas à matéria orgânica e à estrutura do solo. Os indicadores visuais e analíticos mostraram sensibilidade às pressões de uso, distinguindo nitidamente os ambientes: a mata nativa apresentou melhor qualidade, o SAF indicou recuperação consistente sob manejo agroecológico e a pastagem evidenciou acentuada degradação física e biológica. Os métodos visuais provaram ser eficientes, rápidos e de baixo custo, configurando-se como ferramentas eficazes para o monitoramento da qualidade do solo e ampliando a capacidade diagnóstica em contextos de recursos limitados. Com base nesses resultados, foi elaborado o guia ilustrado **“Diagnóstico Visual da Qualidade do Solo: Um Guia Prático ao Agricultor Familiar”**, que sistematiza os procedimentos de campo, facilita sua aplicação pelos produtores e incentiva a adoção de práticas conservacionistas.

**Palavras-chave:** Qualidade do solo; manejo conservacionista; pastagem; SAF; manual ilustrado.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Jessica Gomes Siqueira de. **Visual Soil Indicators: Subsidies for a Practical Guide for Family Farmers**. 2025. Master's dissertation of the Postgraduate Program in Environmental Sustainability Management – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2025.

Soil quality is essential for the sustainability of ecosystems and the maintenance of productive systems, and is directly influenced by use and management. Visual indicators have emerged as practical, accessible, and low-cost tools, providing rapid diagnoses of the physical, chemical, and biological conditions of the soil. This study aimed to select and evaluate the sensitivity of these indicators under different types of use or management in the Sorocaba and Middle Tietê River Basin and organize the information into a practical guide for family farming. Three environments with different use pressures were examined—native forest (MT), agroecological agroforestry system (SAF), and degraded pasture (PAST)—located in the municipality of Araçoiaba da Serra (SP). The visual analysis considered indicators such as color and odor, compaction, infiltration, root development, susceptibility to erosion, presence of macrofauna and litter, stoniness, soil cover, and effervescence in hydrogen peroxide. These indicators were complemented by laboratory parameters, enabling greater precision in interpreting sensitivity to management practices. The results demonstrated that the visual indicators clearly respond to the differences between the evaluated systems, showing strong complementarity with the laboratory analyses, especially those related to organic matter and soil structure. Visual and analytical indicators showed sensitivity to usage pressures, clearly distinguishing between environments: native forest showed better quality, SAF indicated consistent recovery under agroecological management, and pasture showed marked physical and biological degradation. Visual methods proved to be efficient, fast, and low-cost, establishing themselves as effective tools for monitoring soil quality and expanding diagnostic capacity in contexts with limited resources. Based on these results, the illustrated guide **“Visual Diagnosis of Soil Quality: A Practical Guide for Family Farmers”** was developed, which systematizes field procedures, facilitates their application by producers, and encourages the adoption of conservation practices.

**Keywords:** Soil quality; conservation management; pasture; agroforestry system; illustrated manual.

## SUMÁRIO

<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Revisão de literatura</b> .....	<b>4</b>
2.1 Qualidade do solo e seus indicadores.....	4
2.1.2 Índice de Qualidade do Solo (IQS) como ferramenta de monitoramento da fertilidade e conservação do solo conforme o uso da terra.....	12
2.1.3 Indicadores visuais como ferramenta de suporte à agricultura de baixo nível tecnológico .....	15
<b>3 Material e métodos</b> .....	<b>27</b>
3.1 Localização e caracterização das áreas de estudo .....	27
3.2 Condições experimentais e tratamentos .....	28
3.3 Caracterização das áreas por indicadores químicos e físicos de qualidade do solo por métodos e ensaios convencionais .....	32
3.4 Elaboração de metodologia e avaliação dos indicadores visuais de qualidade do solo.....	36
3.5 Análise dos dados .....	41
3.6 Subsídios para elaboração do guia de qualidade do solo .....	42
<b>4 Resultados e discussão</b> .....	<b>43</b>
4.1 Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores químicos e físicos, obtidos por métodos analíticos.....	43
4.2 Avaliação da qualidade do solo por indicadores visuais .....	50
4.3 Apresentação do guia “Diagnóstico Visual da Qualidade do Solo: Um Guia Prático ao Agricultor Familiar” .....	63
<b>5 Conclusões</b> .....	<b>64</b>
<b>6 Referências</b> .....	<b>65</b>
<b>Apêndice 1</b> .....	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A degradação dos solos tem sido alvo de estudos e preocupação mundial. A ciência de que os recursos do solo são finitos, enquanto a expansão populacional ocorre de forma acelerada, tem gerado esforços da iniciativa pública e privada em relação à conservação do solo (Karlen; Stott, 1994). A Organização das Nações Unidas (ONU) estimou a perda de solos (degradação de suas propriedades e do potencial produtivo) em torno de 6 a 7 milhões de hectares por ano (Guerra; Jorge, 2014).

Este fenômeno global está presente em várias modalidades de agricultura, incluindo a familiar. Embora tenha produção em menor escala, a carência de assistência técnica em pequenas propriedades tem contribuído para continuidade de técnicas não conservacionistas, gerando perda de solo e diminuição significativa na produtividade (Valarini *et al.*, 2011; Silva; Cavalcante; Silva, 2016). Observa-se que a perda da qualidade dos solos não está ligada necessariamente à modalidade de agricultura, mas sim à falta de ações de conservação do solo e água (Primavesi, 2008; Valarini *et al.*, 2011).

Ainda que o nível tecnológico da agricultura familiar seja considerado baixo, ressalta-se que neles há um conhecimento altamente empírico (Carvalho *et al.*, 2019). Todavia, muito dos saberes transmitidos sobre a prática dialogam com os conhecimentos técnicos, o que é alvo de estudo da etnopedologia (Correia, 2005; Ferreira, 2020). Por esse motivo, é necessária uma sistematização desse conhecimento transmitido oralmente entre gerações de produtores (Toledo; Barrera-Bassols, 2015).

Do ponto de vista da extensão rural, a observação direta e a experimentação prática são utilizadas no cotidiano dos produtores, influenciando na tomada de decisões sobre o manejo a ser adotado no solo. Elementos como aeração, cor, odor, profundidade do perfil e desenvolvimento radicular podem ser avaliados a campo, configurando-se como alguns exemplos de indicadores visuais de qualidade do solo facilmente aplicáveis (Primavesi, 2008; Friedman *et al.*, 2001; Laishram *et al.*, 2015). Esses indicadores permitem compreender, de forma prática e eficiente, o estado do solo e embasam tomadas de decisão sobre quais práticas agrícolas deverão ser realizadas. Os produtores possuem conhecimentos práticos sobre indicadores visuais

de qualidade do solo, os quais são aplicados em seu cotidiano, muitas vezes de forma indireta. Todavia, muitas vezes se torna necessário verificar a sensibilidade desses indicadores e complementar com dados analíticos obtidos em laboratório para a sua aceitação e recomendação em estudos que envolvem a qualidade do solo.

Define-se qualidade do solo como sua capacidade de funcionar no ecossistema e interagir com o meio (Larson; Pierce, 1994; Doran; Parkin, 1994; Simon *et al.*, 2022), provendo relações ecossistêmicas, sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes e suporte à biodiversidade (Bünemann *et al.*, 2018). Diversos estudos encontraram formas de “medir” a qualidade do solo por meio de indicadores, que devem ser fáceis de mensurar e ter sensibilidade às mudanças no solo, além de representar suas propriedades químicas, físicas e biológicas e oferecer métodos quantitativos e qualitativos de avaliação (Friedman *et al.*, 2001). Entre os métodos qualitativos, citam-se as avaliações visuais da qualidade do solo, realizadas a campo.

Os primeiros métodos visuais foram desenvolvidos ainda em 1959, por Peerlkamp, que elaborou um protocolo de avaliação da camada arável (Emmet-Booth *et al.*, 2016). Desde então, diversas metodologias surgiram e se difundiram, como o VSA (*Visual Soil Assessment*) de Shepherd (2000), o VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*) de Ball, Batey e Munkholm (2007), e a RAQS (Referência para Avaliação da Qualidade do Solo) de Souza *et al.* (2016).

Mais recentemente, Schiebelbein, Souza e Cherubin (2025) publicaram o SOHMA KIT®, uma ferramenta prática e de baixo custo para avaliação rápida da qualidade do solo em campo. Esses avanços evidenciam a evolução das metodologias em direção a técnicas mais simples, participativas e adaptadas à realidade dos agricultores.

Especificamente, a compilação de indicadores com informações e imagens em um único documento ou guia pode ser uma boa estratégia de aplicação em campo, de forma a estabelecer uma maior conexão entre dados empíricos observáveis (visuais) e aqueles obtidos em condições de laboratório. Nesse caso, além de dialogar com a literatura científica, esta pesquisa está alinhada à Meta 2 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS-2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável), que recomenda a implementação de técnicas agrícolas capazes de melhorar progressivamente a qualidade da água e do solo (ONU, 2023). O guia proposto busca não apenas disseminar práticas de manejo sustentável, mas também promover maior engajamento e senso de pertencimento entre os agricultores familiares, tornando a

ciência mais próxima de sua realidade.

Nesse contexto, objetivou-se com esta pesquisa:

**Objetivo geral:**

Estudar a sensibilidade de indicadores visuais na avaliação da qualidade de solo sob diferentes coberturas vegetais, propondo a construção de um guia-prático para aplicação em campo.

**Objetivos específicos:**

Selecionar indicadores visuais de qualidade do solo baseados em metodologias existentes, considerando sua aplicabilidade nas condições de campo locais e da agricultura de baixo nível tecnológico; aplicar indicadores visuais, comparando os diferentes ambientes definidos e propor, na forma de um guia, um conjunto de indicadores de qualidade do solo que seja sensível aos impactos do uso e manejo da terra nos ambientes estudados; avaliar e propor, a partir de ensaios de campo e de laboratório, um conjunto de indicadores de qualidade do solo que seja sensível aos impactos do uso e manejo da terra, selecionando aqueles que mais explicam e guardam maior relação com as respostas obtidas a partir dos métodos visuais.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Qualidade do solo e seus indicadores

Conceituar o termo “qualidade” é uma dificuldade relatada em diferentes áreas do conhecimento. Relata-se que qualidade é algo “fácil de reconhecer, difícil de definir” (*Library Association*, 1994), podendo ser entendida como “conformidade”, ou seja, quando algo cumpre sua função da forma esperada a partir de padrões (Gomes, 2004; Roth, 2011). A ideia de “qualidade” é associada a termos como performance, funcionalidades, fiabilidade e aparência (Gomes, 2004).

O termo “qualidade do solo” gera muitas discussões a respeito de sua definição. Mausel (1971) foi o primeiro pesquisador a utilizá-lo, conceituando-o como a habilidade de o solo fornecer suporte à produtividade de cereais sob condições de alto manejo. Ao longo do tempo, o conceito evoluiu, recebendo definições mais amplas. Entendeu-se que qualidade do solo não compreende apenas fatores de produtividade, mas sim a sua capacidade de dar suporte às funções do ecossistema, como ciclar nutrientes, sequestrar carbono, dar suporte à biodiversidade etc. (Bünemann *et al.*, 2018).

A qualidade do solo é fundamental para prover a produtividade agrícola e a sustentabilidade de um ecossistema (Doran; Parkin, 1996; Sharma *et al.*, 2023). No entanto, é difícil defini-la e mensurá-la de maneira objetiva (Karlen; Stott, 1994; Doran; Parkin, 1996). Doran e Parkin (1996) consideraram a abstração do conceito de “qualidade do solo” como uma dificuldade em entendê-la com exatidão, logo, em obter parâmetros quantitativos (objetivos) para avaliá-la. Esses parâmetros são chamados de indicadores de qualidade, e são amplamente utilizados na ciência do solo.

Para maior compreensão a respeito dos indicadores, tomam-se por exemplo outras áreas do conhecimento: a medicina e as ciências sociais. Conforme Larson e Pierce (1994), a análise da qualidade do solo pode ser comparada à avaliação do estado da saúde humana. Nela, se utilizam fatores físicos considerados básicos para analisar o funcionamento do corpo, como pressão arterial, temperatura, pulsação, etc. O “funcionamento do corpo” pode ser comparado ao funcionamento adequado do solo, ou seja, sua qualidade. No caso das ciências sociais, para se mensurar a qualidade de vida e o desenvolvimento social (que são conceitos abstratos), são

usados índices para aferir, por exemplo, a efetividade de políticas públicas, como taxa de mortalidade, distribuição de renda, etc. (Soligo, 2012). Todos esses parâmetros mencionados são indicadores utilizados em outras ciências, sendo um raciocínio que pode ser aplicado também em solos.

Em uma definição mais detalhada, Ferreira, Cassiolato e Gonzales (2009, p. 24) afirmam que indicador é:

(...) uma medida, de ordem quantitativa ou qualitativa, dotada de significado particular e utilizada para organizar e captar as informações relevantes dos elementos que compõem o objeto da observação. É um recurso metodológico que informa empiricamente sobre a evolução do aspecto observado.

Ou seja, ainda que “qualidade” seja um conceito abstrato, indicadores quantificam parâmetros qualitativos ou quantitativos e informam sobre a evolução de atributos do solo, sendo uma maneira de monitorar rapidamente as mudanças que ocorrem no ecossistema. Esses fatores são fundamentais sob o ponto de vista do manejo agropecuário e conservação dos solos. Ao utilizar indicadores de qualidade do solo, trabalha-se utilizando parâmetros descritivos e/ou analíticos. Os indicadores descritivos são visuais e morfológicos (como cor, erosão, cobertura, friabilidade, coesão), enquanto os analíticos são relacionados a atributos químicos, físicos e biológicos (Reinert, 1998), requerendo análises laboratoriais.

### **Indicadores químicos**

Os indicadores químicos, de forma geral, são aqueles que refletem a capacidade de um solo em fornecer nutrientes às plantas. Podem ser mencionados através do termo “fertilidade” e se mensuram através de testes laboratoriais, sendo frequentemente empregados na análise de solos agrícolas. Nesse sentido, avaliam-se pH (acidez), teor de matéria orgânica, salinidade, saturação por bases (V%), por alumínio (Araújo *et al.*, 2012) e por hidrogênio, além da concentração de macro e micronutrientes. Tais atributos são úteis para avaliação da fertilidade e recomendações de adubação e calagem (Cantarella *et al.*, 2022; Karlen; Stott, 1994).

A matéria orgânica possui importância vital para o solo, e define-se pelo material complexo composto por combinação entre carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre (Silva *et al.*, 2023; Carvalho, 2015). É formada a partir da decomposição de resíduos vegetais e animais, através da participação fundamental da microbiota

edáfica (Carvalho, 2015). Possui papel central na fertilidade de um solo, pois funciona como um estoque de nutrientes, influenciando em seu aporte e disponibilidade às plantas (capacidade de retenção e troca de íons e ciclagem de nutrientes). É um componente que, inclusive, influencia na capacidade de um solo de estocar de carbono (Gerke, 2022), contribuindo para seu sequestro e estabilização. Funciona como tamponadora de acidez do solo e substrato para a biota que nele existe. Além da função de fertilidade, a MO é um forte condicionador de propriedades físicas e físico-hídricas do solo, podendo reter mais água do que sua própria massa (Silva *et al.*, 2023), contribuindo para fertilidade, estrutura e estabilidade edáfica (Doran; Parkin, 1994). Ou seja, a MO possui fundamental importância para a qualidade do solo, pois atua na sustentação de seu funcionamento e saúde. Nela, predomina a forma orgânica do carbono (cerca de 58% da composição), sendo o maior reservatório de carbono do planeta, superior ao da atmosfera e da vegetação (Lehmann; Kleber, 2015).

O Carbono Orgânico do Solo (COS) é um importante indicador da qualidade do solo, pois influencia o ciclo de nutrientes, a estrutura (formação de agregados), a retenção de água e a atividade microbiana (Oliveira *et al.*, 2020; Parjev *et al.*, 2025). A redução no estoque de carbono, geralmente causada por manejos não conservacionistas, acarreta perda de qualidade e funcionalidade do solo (Silva *et al.*, 2023). Os diferentes usos da terra afetam diretamente os teores de COS: áreas com pouca interferência antrópica, como matas nativas, apresentam maiores estoques e melhor fertilidade (Dornellas *et al.*, 2025), enquanto sistemas agrícolas e pastagens extensivas reduzem o carbono, especialmente nas camadas superficiais. Estudos com canaviais mostraram menor estabilidade de agregados e decréscimo do COS em relação à vegetação nativa (Oliveira *et al.*, 2010), e na bananicultura da Mata Atlântica foi observada redução de cerca de 30% no carbono após 30 anos de cultivo, indicando perda regional de qualidade do solo (Silva *et al.*, 2022). Em contrapartida, sistemas agroflorestais (SAFs) demonstram alto potencial de sequestro e estabilização do carbono. Barman *et al.* (2025) verificaram maiores estoques de COS em consórcios agrícolas no Himalaia, enquanto Suárez, Segura e Andrade (2024) observaram aumento do carbono em SAFs na Amazônia, e Fonkeng *et al.* (2024) relataram maior fertilidade e acúmulo de COS em SAFs de cacau nos Camarões. Assim, conclui-se que o COS é fortemente influenciado pelo manejo e uso da terra, sendo as práticas conservacionistas essenciais para preservar a qualidade do solo, aumentar a

produtividade agrícola e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (Peri *et al.*, 2024).

Quanto aos nutrientes, cita-se o fósforo como limitador de produtividade em diversos solos. É formador da molécula de ATP (trifosfato de adenosina), essencial para energia dos processos metabólicos das plantas, além de ser componente de proteínas, enzimas e açúcares (Muindi, 2019). No solo, ocorre na forma orgânica e inorgânica. A fração orgânica é inerte, e somente após a mineralização realizada pelos microrganismos é disponibilizada às reações químicas (Larsen, 1967). Nos solos brasileiros, os teores de fósforo na solução do solo são baixos, pois a maior parte se encontra fortemente adsorvida aos coloides (Santos *et al.*, 2011).

O potássio é um macronutriente essencial para funções fisiológicas das plantas, tais como controle do crescimento celular, expansão de raízes, regulação do fluxo osmótico, translocação de solutos e metabólitos e resposta ao stress. O potássio presente na solução do solo é de cerca de 0,1 a 0,2%, estando imediatamente disponível às plantas, enquanto as frações não disponíveis são de 91 a 99% da quantidade total (Sardans; Peñuelas, 2021).

O cálcio é um nutriente presente em concentração significativa nas plantas, participando no crescimento meristemático, dos processos de expansão celular e da parede das células (Burstrom, 1968). É um cátion trocável, presente no complexo de troca do solo. Possui papel importante na determinação do pH e da concentração de íons tóxicos como alumínio e manganês (Ronquim, 2010).

O enxofre é um nutriente que participa do metabolismo vegetal na formação de proteínas (estrutura e regulação) e enzimas (Epstein; Bloom, 2005). Está presente na solução do solo, forma pela qual é absorvido pelas plantas em maior parte na forma orgânica. Sua mineralização é favorecida pela matéria orgânica (Moreira; Siqueira, 2006).

O magnésio um macronutriente que participa diretamente na formação da molécula de clorofila, ou seja, atua nos processos fotossintéticos. Atua na molécula de pectina e na regulação osmótica das células. Está disponível na forma catiônica, na solução do solo e no complexo de troca (Castro *et al.*, 2020).

Outro indicador químico importante para interpretação da fertilidade do solo é o Potencial Hidrogeniônico (pH), propriedade que reflete a quantidade de íons hidrogênio ( $H^+$ ) presentes na solução do solo, refletindo suas condições químicas gerais. Quanto menor o pH, mais hidrogênio há ocupando sítios de troca da solução

do solo, causando indisponibilidade de bases ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ) e elevação de alumínio e manganês, além de fixação do fósforo aos coloides e deficiência de micronutrientes. É um indicador da situação biológico-físico-química edáfica (Ronquim, 2010).

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) é a capacidade reativa de um solo. Corresponde à soma das cargas positivas adsorvidas reversivelmente nos sítios de troca das partículas coloidais, expressando, assim, o total de cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ ) retidos na superfície. Possui papel central na fertilidade de um solo, variando conforme a natureza do material mineral (ex. caulinita, vermiculita, óxidos de ferro e alumínio etc.) (Ronquim, 2010).

A Saturação por bases (V%) é a soma de bases trocáveis representada em porcentagem da Capacidade de Troca de Cátions (CTC). É um excelente indicador de fertilidade do solo: se eutróficos ( $V\% \geq 50\%$ ), são considerados férteis; se distróficos ( $V\% < 50\%$ ), são pouco férteis (Ronquim, 2010; Cantarella *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2025a). Já a Saturação por alumínio (m%) é o parâmetro que indica a porcentagem de alumínio tóxico que ocupa o complexo de troca (CTC efetiva) de um solo. A alta m% indica um solo ácido, considerado muito pobre (Ronquim, 2010).

### **Indicadores físicos**

Indicadores físicos refletem atributos do solo e envolvem granulometria, espessura dos horizontes, agregação, drenagem/retenção de água, condutividade hidráulica, resistência à penetração, estabilidade de agregados, capacidade de campo, profundidade etc. (Karlen; Stott, 1994; Araújo *et al.*, 2012). Para Araújo *et al.* (2012), as características físicas são importantes por serem interdependentes e, caso uma delas seja alterada, pode modificar todas as outras. Além disso, são capazes de sinalizar a degradação do solo a depender do manejo empregado (Ramos *et al.*, 2014).

Um dos indicadores físicos é a textura ou composição granulométrica é a propriedade que se refere ao tamanho, forma e proporções dos minerais que formam o solo, ou seja, a proporção entre areia, silte e argila existente em determinado volume de material (Almeida, 2005). É o aspecto que sofre menor alteração de acordo com o tempo e tem forte relação com o teor de matéria orgânica (Lepsch; Machado; Espironelo, 1982; Antônio, 2025). Sua importância se deve, além da interação com a matéria orgânica, à sua influência no teor de água, comportamento mecânico,

temperatura e desempenho dos nutrientes no solo (Doran; Parkin, 1994; Alexandre; Silva; Ferreira, 2001). O tamanho dos poros, fator de suma importância para o desenvolvimento das plantas, é determinado em parte pela composição granulométrica (Braidá *et al.*, 2011). A respeito dos poros, porosidade é a propriedade que representa a fração do volume de solo que pode ser ocupada pela água ou pelo ar. Possui papel fundamental para o entendimento do movimento e retenção de água, ar e solutos (Almeida *et al.*, 2017).

Uma propriedade que tem relação com a porosidade é a agregação, processo pelo qual grupos de partículas de solo se mantêm unidos entre si com maior força do que em relação às partículas vizinhas, formando macro e microagregados. Está relacionada diretamente a processos bióticos e abióticos, como crescimento das plantas (pelo enraizamento), atividade microbiana, exsudação de plantas e microrganismos, estabilização físico-química, práticas de manejo e presença de cálcio e magnésio (Hernani, 2021; Garland *et al.*, 2024). É o resultado do rearranjo, floculação e cimentação das partículas, o que é mediado por COS, granulometria, biota e íons do solo (Bronick; Lal, 2005).

Os agregados possuem estabilidade, que é sua capacidade de resistir à desagregação quando submetidos a forças externas, como o impacto da chuva, variações de umidade, manejo agrícola, vento e degradação da matéria orgânica (Barthes; Roose, 2002; Brooker *et al.*, 2020; NRCS, 2022). Sua importância está ligada à resistência à erosão, retenção de água e desenvolvimento de raízes. Um solo que não possui agregados estáveis pode apresentar crostas, ser sujeito à dispersão de partículas em água e baixa porosidade, sobretudo em condições de movimentação como tráfego agrícola e passagem de água (NRCS, 2022; Junqueira, 2019).

Também relacionada à estabilidade dos agregados, resistência à penetração é o indicador que mensura o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a força física que este exerce sobre as raízes das plantas durante seu crescimento (Medina; Camacho-Tamayo; Cortés, 2012). Se relaciona com a qualidade do solo por revelar sua compactação e sua susceptibilidade à erosão (Iori; Dias Júnior; Silva, 2012). Esta propriedade influencia na infiltração, relacionada à penetração da água no solo sob influência da gravidade (Sobrinho *et al.*, 2003; Assouline, 2012). É um processo complexo, que depende de vários fatores como a textura edáfica, topografia, temperatura, taxa de suprimento de água e, indiretamente, atividade biológica e

microbiana do solo (Assouline, 2012). É um fator que influencia na lixiviação de nutrientes e susceptibilidade à erosão (Doran; Parkin, 1994).

Já a condutividade hidráulica corresponde à velocidade com que a água se desloca através das camadas do solo, sendo condicionada por elementos externos — como a presença de cobertura vegetal e o teor de matéria orgânica — e por características internas, incluindo o conteúdo de água e a porosidade. A condutividade hidráulica saturada ocorre quando os poros do solo estão preenchidos (incluindo canais de macrofauna e fissuras). Já a condutividade não saturada ocorre quando os poros não estão preenchidos, sendo relacionada à infiltração superficial de água, informação fundamental para o planejamento do uso e manejo eficiente do solo e dos recursos hídricos (Meter Group, 2021; Santos *et al.*, 2025c).

O Grau de Flocculação (ou Índice de Flocculação) indica a proporção da fração argila que se mantém naturalmente flocculada no solo (IAC, 2021). Quanto maior for esse valor, maior a estabilidade da estrutura do solo, evidenciando uma maior coesão entre as partículas e maior resistência à ação dos agentes erosivos (Barreto *et al.*, 2019). A Argila Dispersa em Água (ADA) corresponde à fração de argila obtida na análise granulométrica quando se utiliza somente água como agente dispersante. Esse parâmetro é frequentemente relacionado à estabilidade dos agregados e à vulnerabilidade do solo à erosão hídrica. Valores elevados de ADA geralmente indicam menor estabilidade dos agregados e redução da resistência do solo aos processos erosivos (Freitas, 2011).

O Diâmetro Médio dos Agregados é um índice que representa o estado de agregação do solo, caracterizando a distribuição dos tamanhos diferentes de agregados que o compõem. Diâmetro Médio Ponderado (DMP) representa a distribuição relativa de solo entre as diferentes classes de agregados, sendo expresso em milímetros. Esse valor se eleva à medida que cresce a participação das classes de agregados de maior tamanho. Diâmetro Médio Geométrico (DMG) expressa o tamanho que aparece com mais frequência entre os agregados, sendo também descrito em milímetros (Madari, 2004).

### **Indicadores biológicos**

Indicadores biológicos são capazes de fornecer dados sobre os componentes vivos do solo e os processos que são mediados por seus organismos, sendo os

parâmetros mais importantes para avaliar o funcionamento edáfico (USDA, 2015). O entendimento de Mendes *et al.* (2021) corrobora esta abordagem, pois, para os autores, a biologia está na base da saúde do solo. Uma mudança de manejo é capaz de alterar rapidamente a biota, que é sensível a diversos estresses como déficit hídrico, excesso de umidade, contaminantes etc. Ou seja, tratando-se de qualidade de solo, o fator biológico se constitui em um indicador eficiente (USDA, 2015).

Um indicador biológico importante é a biomassa microbiana, material vivo e ativo, principalmente composto por fungos e bactérias, sendo componente da matéria orgânica dos solos. É um atributo biológico que controla decomposição e acúmulo de MO, além da ciclagem de nutrientes, representado em  $\mu\text{g}$  de C/g ou mg de C/kg de solo seco. Como possui forte relação com o estado da MO, esse bioindicador pode ser útil para apontar, em tempo hábil, mudanças que indiquem sua perda nos solos agrícolas (Reis Júnior; Mendes, 2007). Sua atividade é altamente concentrada na profundidade mais superficial, sobretudo no intervalo entre 1 e 30 cm (Araújo; Monteiro, 2007). Os dados de biomassa e atividade microbiana podem ser utilizados como indicadores de qualidade do solo, sendo sensíveis à influência do manejo sobre ambiente (Melloni *et al.*, 2008).

Outra forma de compreender a atividade microbiana é a mineralização de nutrientes (N, P e S), processo de conversão da forma orgânica de um nutriente em inorgânica por microrganismos (Robertson; Groffman, 2007; Spohn; Kuzyakov, 2013; Hagemann; Harter; Behrens, 2016;). A mineralização torna possível que os estoques de fósforo do solo, por exemplo, se tornem disponíveis às plantas. Ou seja, é essencial para manutenção da fertilidade do solo (Spohn; Kuzyakov, 2013), portanto, sendo um bioindicador de qualidade.

A atividade dos microrganismos é o parâmetro que mede a soma de todas as funções metabólicas do solo em que o  $\text{CO}_2$  é produzido, sendo também denominada respiração basal. Mensura a atividade dos microrganismos ao degradar compostos orgânicos, respondendo rapidamente às mudanças nas condições edáficas, como umidade, temperatura, manejo e composição do substrato por exemplo (Mercante *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2013). Também é possível compreender o quão bioativo está o solo através das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, relacionadas aos ciclos do carbono e do enxofre. Um aumento do nível dessas duas enzimas indica a atividade dos microrganismos e o incremento de matéria orgânica. Recentemente, as análises de solo mais completas passaram a integrar o componente biológico por meio da

metodologia denominada BioAS (bioanálise), desenvolvida pela Embrapa, em que se mensuram os níveis de arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase no solo. Tais bioindicadores fornecem dados sobre a memória do solo (somatório da atividade enzimáticas dos organismos vivos e de gerações anteriores de organismos que estiveram presentes no solo) (Mendes *et al.*, 2021).

### **2.1.2 Índice de Qualidade do Solo (IQS) como ferramenta de monitoramento da fertilidade e conservação do solo conforme o uso da terra**

Estimar um parâmetro qualitativo é, muitas vezes, dificultoso, o que se aplica à quantificação dos indicadores de qualidade do solo (Freitas *et al.*, 2012). A comunidade científica obteve modelos de cálculo desenvolvidos para acessar o potencial de produção dos solos, tendo evoluído para Índice de Qualidade do Solo (IQS): um valor calculado através de fórmulas, baseado em um arranjo de dados relacionados a funções-chave (Larson; Pierce, 1994; Chaer, 2010), cuja finalidade é ser uma medida quantitativa que traduz, em número, a qualidade do solo (Doran; Parkin, 1994). Através do IQS, é possível traduzir os resultados de indicadores físicos, químicos e biológicos de forma integrada, devendo ser simples, conciso e de fácil interpretação (Simon *et al.*, 2022).

Nesse sentido, o IQS é fundamental para determinar a sustentabilidade do sistema de manejo a curto e longo prazo, sendo útil para identificar áreas com problemas produtivos (Doran; Parkin, 1994). Diversos estudos utilizam o IQS como ferramenta de análise. Casalinho *et al.* (2007) concluíram que, ao longo do tempo, um manejo agroecológico melhorava as capacidades de o solo exercer suas funções e se regenerar, o que correspondeu a maiores IQS. Para os autores, o IQS é uma ferramenta útil às tomadas de decisão sobre o sistema de manejo no sistema avaliado. Freitas *et al.* (2012) concluíram que o IQS refletiu as diferenças de manejo empregadas entre os sistemas agrossilvipastoris e em comparação com o solo de mata nativa (cerrado). Para Luz (2017), a utilização do IQS demonstrou a relação entre manejo e degradação do solo nos diferentes usos da terra, fornecendo inclusive dados suficientes para nortear o tipo de atividade adequada para cada textura.

Uma outra metodologia que utiliza o IQS é a *Soil Management Assessment Framework* (SMAF). Desenvolvida inicialmente para os solos dos Estados Unidos, consiste em uma ferramenta também útil para detectar o impacto das mudanças de

manejo na saúde do solo. O método consiste na seleção de um conjunto mínimo de dados (indicadores químicos, físicos e biológicos), sua interpretação de indicadores através de curvas de pontuação e integração dos dados por meio do IQS. Este índice reflete a performance das funções do solo, incluindo fertilidade e propriedades físicas (Andrews; Karlen; Cambardella, 2004). Posteriormente, Cherubin, Tormena e Karlen (2017) também testaram a SMAF, aplicando-a em áreas de pomar citrícola, mandiocultura, solo adubado (adubação mineral e orgânica), sistema plantio direto e solo manejado em relação à mata nativa. Como resultado, os autores observaram que o método foi eficiente em demonstrar mudanças no manejo, sendo sensível às variações texturais.

Amorim *et al.* (2020) utilizaram a metodologia SMAF para avaliar os impactos do pastejo sobre o solo durante 15 anos em Booneville, nos Estados Unidos. Cinco áreas de pastagem foram analisadas, as quais estavam sob diferentes pressões de uso e manejo (pastejo rotacionado e não rotacionado, uso para fenação, utilização e não utilização de fertilizantes). Os parâmetros que compuseram o IQS foram carbono orgânico, carbono da biomassa microbiana, densidade aparente, a estabilidade de macroagregados, umidade e condutividade elétrica. Os autores concluíram que o SMAF, através do IQS, identificou os impactos do manejo de pastagens em longo prazo na qualidade do solo, identificando assim os potenciais benefícios de práticas sustentáveis em pastejo.

Melo *et al.* (2024) utilizaram o IQS para avaliar a qualidade do solo na camada arável (0 a 20 cm) de três agroecossistemas no estado da Paraíba – Brasil, sob classes de solo distintas. A metodologia consistiu em três etapas: seleção de um conjunto mínimo de dados; definição da escala entre 0 e 1 (com funções de pontuação “mais é melhor”, “menos é melhor” ou “valor ótimo”) e integração dos indicadores sob soma ponderada, obtendo-se o valor final do IQS. Os indicadores componentes do IQS incluem atributos químicos e físicos, como: saturação por bases (V%) e alumínio (m %), capacidade de troca catiônica (CTC), estoque de carbono, percentual de sódio trocável, pH e macronutrientes como fósforo disponível (P) e cálcio (Ca<sup>2+</sup>), teor de areia e argila etc. Os autores observaram que a conversão de mata nativa para lavoura decresceu os níveis de fertilidade do solo, corroborando para um IQS considerado baixo. Isso revelou a necessidade de aplicar técnicas conservacionistas de manejo que favoreçam o incremento de matéria orgânica.

O IQS foi empregado por Macedo *et al.* (2024) de maneira semelhante ao trabalho de Melo *et al.* (2024). Realizou-se a pesquisa no semiárido brasileiro, em agroecossistemas de pequenos produtores. O objetivo do estudo foi avaliar a qualidade do solo nesta região, cujos cultivos principais são fruticultura, cultivo de cereais e cactos (Macedo *et al.*, 2024). Realizou-se o experimento em dez propriedades, e o conjunto mínimo de dados foi: Capacidade de Troca Catiônica (CTC), estoque de carbono, porcentagem de sódio trocável, grau de flocculação, pH, condutividade elétrica, teor de fósforo (P) e potássio (K<sup>+</sup>) disponíveis. O conjunto mínimo de dados refletiu o manejo empregado, sendo os indicadores químicos mais responsivos nesse sentido. No entanto, recomenda-se que as propriedades do solo sejam interpretadas em conjunto.

Cherubin *et al.* (2016) testaram o IQS em três propriedades da região centro-sul do Brasil onde, assim como ocorre em outras áreas do país, conversão de uso da terra foi, sequencialmente, vegetação nativa, pastagem e cana-de-açúcar. O intuito principal da pesquisa era determinar, através de IQS, como essa conversão de uso afetava a qualidade do solo nos agroecossistemas. Os pesquisadores utilizaram seis métodos para obtenção do IQS, que variaram desde o uso de 38 indicadores até conjuntos mínimos de dados. Os resultados obtidos demonstraram que a conversão de vegetação nativa em pastagem causou uma queda significativa na qualidade do solo em todos os locais, enquanto a transição da pastagem para a cana-de-açúcar não provocou este efeito. Constatou-se que o IQS de 0,87 para mata, 0,74 para cana-de-açúcar e 0,7 para pastagem, com alta correlação com o estoque de carbono mensurado no solo. A produção de cana melhorou atributos químicos (níveis de macronutrientes e pH) e piorou atributos físicos e biológicos (maior compactação, degradação estrutural e redução de carbono orgânico e da diversidade e atividade de macrofauna e microrganismos). A sensibilidade à mudança de manejo ocorreu em todos os métodos empregados, desde os mais simples e fáceis de aplicar, quanto os mais complexos. Os autores salientam avaliar a qualidade do solo através de um pequeno número de indicadores (como pH, P, K, pontuações da Avaliação Visual da Estrutura do Solo – VESS - e concentração de carbono orgânico) e ponderação proporcional são suficientes para refletir os processos químicos, físicos e biológicos. Ou seja, trata-se de um protocolo eficaz e prático para monitoramento qualidade do solo.

O trabalho de Lima *et al.* (2016) visou determinar o IQS e espacializá-lo em pontos da sub-bacia de Posses – MG, avaliando se este índice pode ser utilizado em pagamentos por serviços ambientais. Os pesquisadores apontaram que a substituição de vegetação nativa por eucalipto, pastagens e culturas anuais nas áreas provocou redução do IQS. Porém, o eucalipto, por conta da deposição de serapilheira, apresentou baixa deterioração de fertilidade e estrutura. Obteve-se o IQS através de atributos químicos e físicos e, através de análise espacial, compreendeu-se como as propriedades do solo se distribuem e se correlacionam com sua capacidade produtiva. Como conclusão, os autores pontuaram que o IQS pode ser uma ferramenta auxiliar para mensurar serviços de conservação do solo e água prestados por agricultores, tornando possível o pagamento por serviços ambientais em solos conservados.

Por meio dos estudos citados, infere-se que o IQS é um mecanismo eficiente na avaliação da qualidade do solo, demonstrando suas funcionalidades complexas através de um único valor numérico. Verifica-se que o índice é sensível às mudanças de manejo, revelando ser útil no contexto da agricultura (ambientes antropizados) e de áreas com menor interferência antrópica (matas nativas). No entanto, nos exemplos apresentados anteriormente, ênfase é dada na utilização de indicadores físicos, químicos e biológicos para cálculos do IQS. Nenhum deles aborda a possibilidade de incorporar aspectos visuais, mesmo sabendo-se de sua importância e aplicação prática, principalmente na agricultura (Doran; Parkin, 1996; Reinert, 1998; Ralisch *et al.*, 2017).

### **2.1.3 Indicadores visuais como ferramenta de suporte à agricultura de baixo nível tecnológico**

Muitas das propriedades físicas, biológicas e químicas do solo se demonstram visualmente (Shepherd, 2000). Conforme mencionado anteriormente, os indicadores visuais de qualidade do solo são perceptíveis através dos sentidos humanos (visão, tato e olfato) (Penning *et al.*, 2015), os quais permitem realizar uma análise descritiva do funcionamento edáfico em determinado momento.

Segundo Niero *et al.* (2010) e Marques (2014), os atributos do solo vêm sendo avaliados através de métodos laboratoriais, incluindo análises químicas da fertilidade do solo. Estas, apesar de serem precisas, requerem maior tempo para obtenção de resultados, possuem por vezes difícil acesso e ocasionam custos ao produtor rural.

Sob a perspectiva da extensão rural, soluções técnicas alternativas devem ser testadas na realidade de campo, de modo a complementar as avaliações da pesquisa (Vallée; Miranda; Doraswamy, 1986). Ou seja, a heterogeneidade das situações no meio rural demanda, como citado, testes rápidos e acessíveis, que forneçam dados para o planejamento produtivo de práticas conservacionistas. Sendo assim, avaliação visual é uma ferramenta adequada à realidade de campo (Reinert, 1998) e da agricultura de baixo nível tecnológico.

A pertinência dessa questão é demonstrada pela avaliação da estrutura do solo, por exemplo. A estrutura é um parâmetro-chave para avaliar o funcionamento físico do solo, inclusive se relacionando com processos químicos e biológicos (Muller *et al.*, 2009). Pela sensibilidade ao tipo de manejo empregado, é um dos atributos mais importantes no monitoramento da qualidade dos solos agrícolas. Para este monitoramento, não há metodologia estritamente quantitativa que seja, por si, satisfatória para avaliar a estrutura do solo e as relações de causa e efeito das ações de manejo. Considerando isso, as avaliações a olho nu permitem representar a complexidade das relações solo-planta-atmosfera da estrutura do solo por meio de indicadores visuais (Ralisch *et al.*, 2017).

Entende-se que a avaliação da qualidade visual do solo deve abranger o máximo de atores, desde a comunidade científica até os agricultores de baixo nível tecnológico. Bons indicadores devem ser compreensíveis tanto para os produtores rurais (de pequenas, médias e grandes propriedades) quanto para técnicos extensionistas, cientistas e gestores públicos (Doran; Parkin, 1996). Para Doran e Parkin (1996), indicadores devem ser eficientes sob o ponto de vista técnico (devendo integrar propriedades que estimem seu funcionamento e que sejam sensíveis às variações de manejo e condições climáticas) e, ainda, ser adequados sob uma percepção de usabilidade (devem de fácil aplicação em campo, sendo rápidos, facilmente compreensíveis e de baixo custo).

Com base nessa percepção, descreve-se abaixo um conjunto de indicadores visuais de fácil aplicação em campo, com suas respectivas definições, que apresentam potencial de utilização em estudos de avaliação da qualidade de solo sob coberturas vegetais ou manejos diferentes. Um deles é a cor, atributo que pode demonstrar, de forma visual, a presença de óxidos de ferro e matéria orgânica, além do teor de umidade e distribuição das partículas (Fernandez; Schulze, 1992). Reflete propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Campos; Demattê, 2004), ou seja, é

um indicador visual das características e atributos de um solo. Por exemplo, solos avermelhados em locais com predominância de amarelados podem sugerir um ambiente melhor drenado, ou, ainda, mosqueados de cores alaranjadas (manchas) ao longo do perfil podem indicar drenagem deficiente. Solos com cores acinzentadas geralmente indicam encharcamento constante, enquanto cores tendendo ao marrom ou preto são indícios da presença de matéria orgânica (Teixeira; Macedo; Martins, 2009). Tais percepções fornecem informações sobre o funcionamento do solo (qualidade), sendo importantes para a tomada de decisões de manejo.

Exploração e desenvolvimento das raízes é um indicador sobre estrutura e consistência do solo. Quando há alta resistência à penetração ou, ainda, presença de camada compactada, por exemplo, as raízes passam a crescer em direção às laterais, achatadas e crescendo preferencialmente nas fissuras do solo compactado (Peerlkamp, 1959; Ralisch *et al.*, 2017; FAO, 2020; FAO, 2025). Há casos em que o comprimento radicular passa a ser menor de acordo com o aumento da resistência à penetração (Peerlkamp, 1959; Rosolem *et al.*, 1999; Bergamin *et al.*, 2010). Essa disfunção dificulta que as plantas absorvam água e nutrientes, o que diminui o aproveitamento dos fertilizantes, favorecendo a perda de nutrientes por lixiviação e reduzindo a produção agrícola. Além disso, raízes podem apodrecer ou morrer devido à ação de pragas e doenças, principalmente em solos mal drenados, com baixa oxigenação e sinais de encharcamento (Ball; Batey; Munkholm, 2007; Shepherd, 2009; FAO, 2025).

Outro fator que influencia no desenvolvimento das raízes é a pedregosidade, partículas maiores que 2 mm que não compõem o solo, sendo cascalho (2 mm – 20 mm), pedras (20 mm – 200 mm), matacões (> 200 mm) ou rochosedades (>1000 mm) (Lepsch *et al.*, 2015). É um fator que influencia na taxa de infiltração do solo e em sua aptidão agrícola, por interferir na germinação de sementes e enraizamento (Melloni *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2016; Souza; Souza; Xavier, 2021). Além da presença de rochas, a porosidade também é um indicador que pode ser avaliado através da observação. O volume, tamanho e distribuição do sistema de poros influencia a qualidade visual de amostras de solo, tendo relação com a biota, infiltração, equilíbrio ar-água e carbono orgânico do solo (Deluz *et al.*, 2025).

Além de indicadores visuais físicos, a qualidade do solo também está relacionada à presença de macrofauna. Os organismos do solo contribuem para a formação de microagregados, exercendo, também, influência sobre os macroagregados. De acordo com os diferentes usos do solo, é notada uma modificação na diversidade de organismos. Ou seja, a presença e variedade de macrofauna é um indicador do funcionamento edáfico (Bossuyt; Six; Hendrix, 2006; Franco *et al.*, 2017).

Um outro indicador visual da presença de matéria orgânica e da atividade microbiana edáficas é a efervescência em peróxido de hidrogênio (Nicholls *et al.*, 2004; Casalinho, 2003). Esta é um sinal visual da reação da enzima catalase, presente em microrganismos aeróbicos, ao decompor o peróxido de hidrogênio. A reação produz bolhas do gás oxigênio (Rocha *et al.*, 2024), formando a efervescência. Diversos estudos têm utilizado este indicador visual de qualidade do solo para atividade microbiana (Casalinho, 2003; Arruda *et al.*, 2012; Marques, 2014; Santos *et al.*, 2020). Além da atividade microbiológica, o peróxido reage com óxidos de manganês e pode confirmar a presença de matéria orgânica no solo (FAO, 2025).

Também relacionada à M.O.S., a nodulação é um indicador relacionado à fixação biológica de nitrogênio, que demonstra a presença de microrganismos simbióticos (Pavanelli; Araújo, 2010).

Normalmente, além dos fatores mencionados anteriormente, um solo com qualidade possui uma camada protetora. Serapilheira é a camada do material orgânico oriundo da senescência da parte aérea das plantas, que passa por decomposição. Possui função de proteção aos processos erosivos, fornecimento de nutrientes e matéria orgânica, melhorando as funções edáficas e, por consequência, a produção vegetal (Andrade; Tavares; Coutinho, 2003; Souza *et al.*, 2016). De modo semelhante à serapilheira, “cobertura do solo” é o termo para a camada que recobre o solo, sendo ela viva (formada por plantas vivas) ou morta (material em decomposição). Da mesma forma, é a camada que protege o solo contra o impacto da água e, consequentemente, da erosão (Kaspar; Singer, 2011; Souza *et al.*, 2016; Ghimire *et al.*, 2023).

A importância dos indicadores visuais se deve ao fato de que, na agricultura, o tipo de manejo afeta os atributos do solo (Niero *et al.*, 2010) e, para a realidade de campo, a agilidade e facilidade na obtenção de informações são essenciais. Obter rapidamente informações sobre o funcionamento do solo é primordial para que se empreguem decisões de manejo em tempo hábil a conservá-lo. Nesse sentido,

Casalinho *et al.* (2007) mencionam que o agricultor deve ser entendido como “ator e parceiro no processo decisório”, porque é o principal agente diretamente envolvido nas decisões que afetam o solo. Portanto, ao aplicar indicadores visuais, deve-se priorizar aqueles cujas funcionalidades atinjam objetivos como: adequação à realidade dos agricultores familiares, praticidade, disponibilidade de materiais e facilidade de acesso. As avaliações visuais são rápidas, seguras, objetivas e demandam pouco investimento (Penning *et al.*, 2015), sendo uma excelente ferramenta de extensão rural. Existem várias metodologias estudadas, que evoluíram ao longo do tempo na ciência do solo, o que será apresentado a seguir.

#### **a) Metodologias de avaliação da qualidade visual do solo**

O trabalho de Peerlkamp (1959, Holanda), é reconhecido como um dos estudos mais antigos na área de avaliação da qualidade do solo (Emmet-Booth *et al.*, 2016). Nele, o autor tinha por objetivo discutir formas de avaliação da estrutura do solo através de parâmetros como tamanho, forma e porosidade dos agregados, coesão, profundidade da camada arável e desenvolvimento das raízes. Para o autor, a avaliação da estrutura poderia ser realizada, em tradução livre, “medindo várias características, observando uma série de características visíveis, dando uma impressão geral, que, com base na experiência, resulta em uma avaliação quantitativa”. Essa ideia demonstra o raciocínio das avaliações visuais de qualidade.

O método de Peerlkamp consistia em, com ajuda de uma pá, obter um bloco de solo e observar seus agregados. Nisso, autor estabelecia as condições de qualidade visual. Por exemplo: agregados de boa qualidade eram aqueles cuja a maior parte media aproximadamente 20 mm de diâmetro (tamanho); aqueles que possuíssem bordas arredondadas eram favoráveis, enquanto os angulares ou prismáticos demonstravam condições pobres (forma); quanto mais coeso o agregado quando apertado entre os dedos, pior a condição do solo (coesão); quanto mais poroso o bloco era, melhor a avaliação, enquanto aparências “lisas” ou “densas” recebiam piores avaliações (porosidade); quanto maior e mais regular o desenvolvimento das raízes, melhor a estrutura (desenvolvimento radicular); se o solo fosse disperso, entendia-se condição desfavorável (dispersão da superfície do solo). O observador atribuía notas de 1 (condição pobre) a 10 (estrutura ideal). O experimento foi replicado por 20 anos no Instituto de Fertilidade do Solo em Groningen, e o autor concluiu que a análise

visual da estrutura do solo foi eficaz para descrever quantitativamente a estrutura do solo cultivável, especialmente pelo grande número de avaliações. Para esta finalidade, o trabalho de Peerlkamp era inovador no sentido de utilizar notas na avaliação visual da qualidade de um solo (Emmet-Booth *et al.*, 2016). O método de Peerlkamp, mais tarde, foi adaptado por outros autores, formando novas metodologias de avaliação.

Posteriormente, o método Werner e Thaemert (1989) (Alemanha) foi publicado com o objetivo de realizar a avaliação física do solo em relação ao crescimento das plantas (Emmet-Booth *et al.*, 2016). A metodologia utilizava a observação do solo para avaliar parâmetros como camadas, tamanho dos agregados, porosidade e presença de bioporos (canais criados pela macrofauna). O método também possuía atribuições de scores (ou entre 1 e 4, ou entre 1 e 5), avaliando cada parâmetro individualmente para cada camada do solo. A avaliação resultava em um número de 5 dígitos, no entanto, era de difícil interpretação e compreensão (Mueller *et al.*, 2009; Emmet-Booth *et al.*, 2016).

Diez, Weigelt e Brandhuber (1997), através do Instituto Estatal de Agricultura da Baviera na Alemanha, lançaram um guia com instruções para testes de solo utilizando uma pá. A metodologia baseou-se na de Peerklamp (1959) e, como diferencial em relação aos outros métodos, cita-se que os autores incluíram imagens em seu guia de campo. As fotografias demonstravam, por exemplo, os testes de agregados, sinais visuais de deficiência de nutrientes, fissuras no solo, encharcamento sob severa compactação, observação do perfil, etc.

Em 1999, o USDA (*United States Department of Agriculture*) lançou um guia de campo com uma série de testes de qualidade do solo, de autoria de Doran *et al.* (1999). Nele, o USDA lança um kit para avaliação da qualidade do solo. Na publicação, os autores demonstram testes de respiração, infiltração, densidade aparente, condutividade elétrica, pH, teor de nitrato, estabilidade de agregados, comportamento à saturação com água, presença de minhocas etc. No entanto, nota-se que, para que o conjunto de testes fosse aplicado em campo, exigiria uma série de materiais nem sempre disponíveis facilmente na propriedade (o kit incluía anéis de solo, seringas, agulhas, tubo Draeger, conta-gotas, peneira de solo, solução Calgon, condutímetro elétrico portátil), além da presença de um técnico para interpretação, aplicação e cálculos. Essa abordagem não se adapta à realidade de muitos pequenos produtores, considerando sua condição de menor nível tecnológico.

Munkholm (2000), na Dinamarca, publicou um estudo sobre o manejo do solo e seus impactos na estrutura do solo. O conjunto de avaliações incluíam novos parâmetros, como cor, textura, consistência, macroporosidade, decomposição da matéria orgânica e fauna do solo, além dos trabalhados pelos outros autores (tamanho dos agregados e desenvolvimento radicular). O autor propôs diferentes sistemas de pontuação para diferentes propriedades (Munkholm, 2000; Emmet-Booth *et al.*, 2016).

Em 2000, Shepherd desenvolveu, na Nova Zelândia, o método VSA (*Visual Soil Assessment* – Avaliação visual do solo). O método se propõe, em tradução livre, como “uma ferramenta de diagnóstico imediata e eficaz para avaliar a qualidade do solo, e os resultados são fáceis de interpretar e compreender”. Consiste na avaliação dos indicadores sobre o estado do solo e desempenho das plantas em um cartão de pontuação, tanto para lavouras quanto para pastagens. O autor esclarece que a inclusão da observação das plantas permite que o avaliador estabeleça relações de causa e efeito entre o manejo empregado e as características do solo. Shepherd (2000) utilizou a atribuição de pontuações (score visual) entre 0 (condição pobre), 1 (condição intermediária) e 2 (condição boa). Adicionalmente, são atribuídos pesos crescentes de 1 a 3 para cada indicador, de acordo com sua importância para a qualidade do solo. A multiplicação entre o score e o peso resulta em um “ranking” da amostra avaliada.

Ressalta-se que o material de Shepherd (2000) é todo ilustrado, funcionando efetivamente como um guia de campo. Os materiais necessários para a avaliação são uma pá, bacia plástica, tábua, saco plástico e cartões de pontuação, além do próprio guia para comparação do solo com as imagens. Os parâmetros a serem avaliados em relação à estrutura do solo são distribuição dos agregados, porosidade, cor, presença de mosqueados, quantidade de minhocas, grau de desenvolvimento dos torrões em solo sob cultivo, susceptibilidade a erosão hídrica e eólica. Quanto aos parâmetros relacionados às plantas, avaliam-se estande de plantas (relacionado com a emergência da cultura), altura ao ponto de maturação, tamanho e desenvolvimento do sistema radicular, doenças de raiz, infestação de daninhas etc.

Ball e Douglas (2003) publicaram um estudo sobre um conjunto de indicadores visuais e táteis com o objetivo de criar um método de avaliação do solo e das raízes em campo, com base no trabalho de Munkholm (2000) e Beste (1999). Nele, um bloco de solo é extraído com auxílio de uma pá. A avaliação considerava as diferentes camadas e incluía ponderação (pesos) para cada uma delas. Como resultado, os

autores concluíram que a metodologia teve ótima correlação entre as notas atribuídas às raízes e a estrutura e que a principal vantagem do método era a descrição padronizada e concisa do solo. Uma limitação do método foi a necessidade de que o material estivesse úmido no momento da coleta e avaliação.

Em 2004, Nicholls *et al.* publicaram um método de avaliação de qualidade do solo em vinhedos, com o intuito principal de ser rápido, simples e aplicável tanto por produtores rurais quanto pesquisadores. O método é aplicável à avaliação da qualidade do solo e saúde das plantas em vários agroecossistemas, utilizando indicadores fáceis de serem mensurados e que permitissem monitorar a qualidade do solo ao longo do tempo. A atribuição de notas também é utilizada, sendo a escala entre 1 (condição ruim), 5 (condição intermediária) e 10 (condição boa). Os parâmetros relacionados ao solo foram: estrutura, compactação, profundidade do solo, estado dos resíduos, cor, odor e matéria orgânica, retenção de água (nível de umidade após irrigação ou chuva), cobertura do solo, erosão, presença de invertebrados e atividade microbológica. Quanto às plantas, os indicadores foram: aparência, crescimento da cultura, incidência de doenças, incidência de pragas, abundância e diversidade de inimigos naturais, competição e pressão de plantas daninhas, rendimento real ou potencial, diversidade vegetal, vegetação natural circundante e sistema de manejo. Além da inclusão da avaliação das plantas, um diferencial deste trabalho é a utilização de um gráfico radial/radar (“*amoeba diagram*”) para representação visual da avaliação em campo, o que facilita a compreensão tanto pelos produtores quanto pelos técnicos extensionistas.

Posteriormente, foi publicado o trabalho de Ball, Batey e Munkholm (2007), conhecido como VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure* ou Avaliação visual da estrutura do solo). O método surgiu como um aprimoramento (ou modificação) do teste desenvolvido por Peerlkamp (1959), com o objetivo de tornar a avaliação visual mais simples e rápida, sensível às condições de manejo, facilmente replicável e aplicável para não-cientistas. O método necessitava de adaptações principalmente porque, segundo os autores, a ênfase no tamanho e coesão dos agregados após quebra requeria avaliações mais avançadas. A escala original de notas também foi discutida pela dificuldade de aplicação: em Peerlkamp, era de 1 a 10, o que Ball, Batey e Munkholm consideravam muito longa. No VESS, a escala foi modificada para 1 a 5 com reversão da ordem (1 passou a ser a melhor classificação, enquanto 5 seria a

mais baixa). Outra diferença em relação ao método de Peerlkamp era por permitir a avaliação de camadas horizontais utilizando uma pá.

A metodologia consiste em extrair um bloco de solo de 15 x 20 cm, examiná-lo, quebrá-lo e atribuir notas de acordo com a observação de sua estrutura (agregados). Os autores incluíram uma série de fotografias de agregados de solo para definir a classificação das notas, variando entre a condição mais e menos desejável em termos de qualidade. As ilustrações funcionavam, então, como uma “chave visual”, com critérios bem definidos. Os parâmetros eram aspecto após a desintegração, tamanho e porosidade visíveis, raízes, facilidade de desintegração e condição do solo (friável, retido à pá, firme, compactado, muito compactado). Como resultado, Ball, Batey e Munkholm (2007) concluíram que a aplicação da metodologia foi fácil, sendo também facilmente aprendida pelos avaliadores. O VESS foi sensível às mudanças de manejo do solo, indicando sua qualidade física e a resiliência por meio de uma avaliação estrutural imediata em campo, útil para verificar a necessidade de preparo do solo ou avaliar as condições de drenagem. Os autores sugeriram que a escala poderia ser utilizada para revelar, em tempo hábil, se haveria necessidade de mudança das condições de manejo. A importância de haver indicações de manejo no método VESS se deve ao fato de que os usuários, principalmente consultores e extensionistas rurais, podem obter rapidamente um direcionamento de manejo do solo em sua propriedade.

No Brasil, as diferentes metodologias de avaliação da qualidade do solo foram estudadas. Casalinho *et al.* (2007) propuseram o Método Integrativo de Avaliação da Qualidade do Solo (MIAQS), com o objetivo de verificar o como um conjunto de indicadores se comportava diante do sistema de manejo e do tempo. Nele, os pesquisadores selecionaram indicadores de qualidade de acordo com metodologias já existentes e na percepção dos produtores. Melloni *et al.* (2008) avaliaram a qualidade visual de áreas com eucalipto, araucária implantada, mata nativa e pasto implantado. A avaliação contou com atribuição de notas (0 a 5) entre indicadores como presença de erosão e pedregosidade, macrofauna do solo, índice de cobertura vegetal, diversidade vegetal, porte/estratificação, vigor da vegetação, presença, estado de decomposição e incorporação da serapilheira e presença de fauna silvestre. Como resultado, os indicadores se destacaram pela eficiência, objetividade e acurácia na diferenciação das distintas classes de cobertura vegetal.

Giarola *et al.* (2009) constataram que, apesar da expansão dos trabalhos na área de estudo, havia poucos estudos realizados no Brasil utilizando métodos visuais de diagnóstico em campo. Portanto, os autores testaram o VESS, desenvolvido para condições de clima temperado, em um solo altamente intemperizado – latossolo vermelho distroférico. O objetivo era verificar se o VESS identificava a qualidade estrutural também em solos tropicais, o que foi comprovado após a realização do experimento. O método foi eficiente em distinguir a qualidade do solo nas diferentes áreas - mata preservada, sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) e sistema plantio direto (SPD).

Mais tarde, Souza *et al.* (2016) testaram cinco métodos de AVQS, como Melloni (2001), Casalinho *et al.* (2007), Nicholls *et al.* (2004), Shepherd (2000) e Carlesi (2008), em pastagens sob diversas condições. O objetivo principal foi testar qual das metodologias era mais sensível para detectar variações de manejo. Os resultados indicaram que os métodos tiveram diferente sensibilidade aos manejos empregados e, a partir disso, os autores propuseram a metodologia RAQS. Nela, foram incluídos novos indicadores de qualidade do solo, plantas e fauna (como reação de oxigenase, presença de fauna, serapilheira etc.), tornando-a mais completa do que as demais.

Outro exemplo é a metodologia da Embrapa desenvolvida por Ralisch *et al.* (2017), que publicaram o DRES - Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo. Seu objetivo era apresentar um método de avaliação da qualidade estrutural do solo prático e rápido, com intervenção mínima na área de estudo e clareza para compreensão e utilização pelos usuários, sendo adaptado aos solos tropicais e subtropicais. A profundidade adotada era de até 25 cm, ou seja, a avaliação se destinava à camada superficial. Conforme a metodologia se denomina, o DRES se propõe a diagnosticar principalmente a estrutura do solo, incluindo os efeitos dos processos de degradação e evidências de recuperação, considerando também o entorno da área avaliada.

Comin *et al.* (2024) publicaram um guia prático de avaliação participativa da qualidade do solo em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH), no estado de Santa Catarina. No material, a avaliação visual é realizada através de uma escala de três números, sendo 1 (pior condição), 5 (condição intermediária) e 10 (melhor condição). Os autores utilizam mata nativa como sistema de referência, e incluíram imagens ilustrativas sobre a estrutura do solo. Adicionalmente, propuseram que os dados gerassem um gráfico radial, o que ilustra a qualidade do solo nas parcelas avaliadas.

## **b) Utilização de guias em qualidade visual do solo**

A visão é um dos sentidos humanos facilitadores dos processos de aprendizagem, sendo explorada através de fotografias e ilustrações (Martins; Gouvêa; Piccinini, 2005). Imagens são ferramentas importantes para comunicação de ideias científicas e sua conceitualização por parte do público-alvo, sendo mais facilmente memorizadas do que suas representações verbais (McDaniel; Pressley, 1987; Martins; Gouveia; Piccinini, 2005). Se tratando de extensão rural, a fotografia pode ser uma ferramenta de aprendizado e promoção da autovalorização de moradores e produtores rurais (Zani; Krummenauer, 2021). Nesse sentido, recursos visuais são valiosos nos processos de aprendizagem que envolvem esse público, inclusive nas avaliações de qualidade do solo.

Diversas metodologias usam recursos de imagem para auxiliar a avaliação visual da qualidade dos solos, como por exemplo, os métodos VESS (Shepherd, 2000) e VSA (Ball; Batey; Munkholm, 2007) (mais tradicionais), que basearam mais metodologias posteriormente. Outros exemplos de guias que utilizam imagens para auxiliar a avaliação no campo são o material de Moebius-Clune *et al.* (2016), da Universidade de Cornell, composto por conceitos em solo e avaliação de sua saúde; o guia de avaliação a campo do USDA (2021), que traz indicadores relacionados à estrutura, cor e atividade biológica (macroorganismos); e o guia de Al-Kaisi e Kwaw-Mensah (2017), que possui diversas ilustrações sobre avaliação física do solo, sendo direcionado às condições pedológicas de Iowa nos Estados Unidos. Os materiais citados possuem muitos conceitos e propriedades úteis à AVQS. Porém, neles se observam itens que, para compreensão, exigem maior repertório e familiaridade com conceitos técnicos da ciência do solo. São exemplos a presença de muitos quadros, triângulos texturais e fluxogramas, além de trechos com linguagem técnica no idioma de origem.

Considerando a realidade de produtores com menor nível tecnológico, têm surgido mundialmente novos guias de avaliação visual com linguagem adaptada às condições locais, sobretudo em países emergentes. Por exemplo, cita-se o trabalho de Corina *et al.* (2017) denominado “kit de ferramentas para análise de solo e boas práticas agroecológicas”, desenvolvido na Bolívia. O guia traz conceitos de qualidade do solo em linguagem simplificada e imagens dos procedimentos de avaliação de QS,

conduzindo-os de forma didática. Outro material citado é o da organização “*A Lighter Touch*” (2023), da Nova Zelândia, que simplifica o VSA em um guia ilustrado de apenas quatro páginas. Nele, são priorizados três testes rápidos (estrutura e porosidade, turbidez e presença de minhocas), que exigem materiais localmente disponíveis como pá, lona, recipientes transparentes, água, fita métrica, caderno e câmera (para obter fotografias de comparação).

A apresentação de todas as metodologias mencionadas, incluindo guias ilustrativos, mostra que os métodos para avaliação e apresentação da qualidade visual do solo evoluíram conforme avanço da Ciência do Solo, ao longo do tempo. Essa evolução gerou percepções sobre a maior eficiência de métodos mais simples e rápidos, o que norteou o desenvolvimento deste trabalho, principalmente em relação aos procedimentos metodológicos que seriam adotados. Nesse sentido, notou-se que, pela sensibilidade dos indicadores visuais em demonstrar mudanças de manejo, seria fundamental sua aplicação em diferentes pressões de uso do solo (ou seja, do sistema com maior interferência humana para a menor), o que foi aplicado na escolha das áreas e das metodologias deste estudo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização das áreas de estudo

O estudo foi realizado no município de Araçoiaba da Serra – SP, em três áreas circunvizinhas (Figura 1) com diferentes tipos de uso e manejo do solo. A classificação climática do local segundo Köppen-Geiger é Cfa – subtropical úmido (ICMBio, 2024; Alvares *et al.*, 2013). O clima Cfa é definido por seu característico verão quente e ausência de estação seca definida (Setzer, 1966; Rolim *et al.*, 2007). A temperatura média anual é de 20,5 °C e a precipitação de 1219 mm ao ano (*Climate Data*, 2024). O solo onde estão localizados os tratamentos é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, conforme Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) (Santos *et al.*, 2025a) e classificação da base de dados da Embrapa (Programa Nacional de Solos do Brasil – PronaSolos, 2025).

**Figura 1.** Visão geral da área experimental (em amarelo) e seu entorno.



Fonte: Google Earth

### 3.2 Condições experimentais e tratamentos

A área experimental possui três tratamentos (aqui denominados área 1, 2 e 3), estando a delimitação de cada um deles representada na Figura 2.

**Figura 2.** Descrição georreferenciada das áreas e parcelas experimentais – Araçoiaba da Serra (SP)



Fonte: Google Earth

A primeira área de estudo (área 1) é um fragmento de floresta secundária ( $23^{\circ}34'16.72''S$ ;  $47^{\circ}42'46.47''O$ ) com fitofisionomia de Mata Atlântica, denominada área 1 (MT). Sua área total é de aproximadamente 1,9 ha, possuindo indivíduos arbóreos com altura entre 3 e 7m e uma parte possui espécimes esguios com copa reduzida, sugerindo intervenção em algum momento e posterior regeneração. Atualmente, um pequeno rebanho de aproximadamente 3 cabeças de gado acessa o local, que possui uma área de pastagem entre suas laterais. A delimitação da área de

mata consta na Figura 3.

**Figura 3.** Fragmento de mata nativa (área 1, MT) – Araçoiaba da Serra (SP)



Fonte: Google Earth

A segunda propriedade ( $23^{\circ}34'20.18''S$ ;  $47^{\circ}42'48.73''O$ ) objeto deste estudo é uma pastagem degradada (área 2, PAST), onde transitam cerca de 10 cabeças de gado leiteiro, com conexão para a pastagem vizinha. Sua área é de 5.200 m<sup>2</sup>, enquanto a altitude do local é de 588 m no ponto mais baixo e de 595 m no mais alto. O histórico do local é também de pastagem há pelo menos 10 anos. Na figura 4, tem-se um croqui da propriedade.

**Figura 4.** Delimitação da segunda propriedade (área 2, PAST) – Araçoiaba da Serra (SP)



Fonte: Google Earth

A terceira propriedade (área 3, SAF) é um sistema agroflorestal denominado “Agroflorestinha”, localizado no bairro do Campo do Meio ( $23^{\circ}34'20.97''S$ ;  $47^{\circ}42'47.79''O$ ). Pelo zoneamento, se enquadra na zona rural. Ao redor, há pequena vila de residências, marcada pela expansão populacional no bairro, cercada por lavouras de grãos e bovinocultura extensiva. Na propriedade, o histórico da cultura anterior é de pastagem degradada, onde se implantou o sistema agroflorestal (SAF) há quatro anos. Nele, há olericultura e horticultura no estrato mais baixo, predominando folhosas, e, ao fundo, predominância de espécies frutíferas e milho. A adubação é orgânica, com uso de calcário, termofosfato e resíduos orgânicos. A área da propriedade é de 1.600 m<sup>2</sup>. A altitude do local é de 589 m no ponto mais baixo, e de 595 m no ponto mais alto. Na Figura 5, tem-se um croqui da propriedade.

**Figura 5.** Delimitação do SAF (área 3) – Araçoiaba da Serra (SP)



Fonte: Google Earth

Conforme Figura 2, as áreas 1, 2 e 3 compuseram os tratamentos definidos como mata nativa (MT), sistema agroflorestal (SAF) e pastagem (PAST), respectivamente, ou seja, em ordem crescente à pressão de uso do solo (área de mata com pressão menor, sistema agroflorestal com pressão intermediária e pastagem com alta pressão de uso). Em cada um deles, foram adotadas 4 parcelas com um raio aproximado de 5 m<sup>2</sup>, totalizando 12 pontos (Figura 2) estaqueados em campo e georreferenciados. Tanto para avaliação visual quanto para obtenção de indicadores por métodos convencionais, foram cavadas minitrincheiras de 0,4x0,4m, conforme Figura 6.

**Figura 6.** Exemplo de mini-trincheira utilizada nas avaliações e coletas de amostras de solo



Foto: Autora (2025)

### **3.3 Caracterização das áreas por indicadores químicos e físicos de qualidade do solo por métodos e ensaios convencionais**

#### **a) Atributos físico-químicos do solo**

A amostragem foi realizada no dia 10/07/2025. Em cada uma das áreas foram coletadas amostras de solo dos horizontes A (camada superficial: 0,0 – 0,10 m) e Bt (camada subsuperficial: 0,2 – 0,40 m) com o auxílio de um enxadão. A avaliação da qualidade do solo por meio de métodos analíticos foi realizada visando obter a caracterização do complexo sortivo, da estrutura e da textura do solo. As amostras deformadas se destinaram a caracterizar os seguintes atributos: textura (argila, silte, areia fina e areia grossa), estabilidade dos agregados através do Diâmetro Médio Geométrico e Ponderado (DMG e DMP), complexo sortivo e teor de matéria orgânica do solo (MOS). Na ocasião, o solo estava em ponto de friabilidade. A análise laboratorial de todas as amostras se realizou no Laboratório de Diagnóstico do Solo, Planta e Fisiologia Vegetal da Unesp de Registro (SP), conforme a metodologia

proposta por Teixeira *et al.* (2017). A caracterização química do solo está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização química do solo para os tratamentos MT, SAF e PAST. Valores médios obtidos de quatro repetições (n=4).

Atributos	Unidade	MT		SAF		PAST	
		Horizontes/Camada de solo estudada					
		A/SP	Bt/SB	A/SP	Bt/SB	A/SP	Bt/SB
pH (CaCl <sub>2</sub> )	-	4,35	3,95	5,23	4,70	4,53	4,08
MOS	g dm <sup>-3</sup>	29,50	9,78	55,50	11,50	38,50	15,00
P (resina)	mg dm <sup>-3</sup>	17,75	4,00	321,25	42,25	21,50	4,75
Al <sup>3+</sup>	mmolc dm <sup>-3</sup>	3,50	12,50	0,00	0,25	1,50	10,50
H+Al	mmolc dm <sup>-3</sup>	37,00	37,63	24,50	21,75	39,75	36,25
K	mmolc dm <sup>-3</sup>	4,45	3,08	11,25	8,78	6,75	4,40
Ca	mmolc dm <sup>-3</sup>	25,25	8,88	156,00	46,50	38,75	15,25
Mg	mmolc dm <sup>-3</sup>	9,25	2,23	29,75	16,00	12,25	4,13
SB	mmolc dm <sup>-3</sup>	39,00	14,25	197,00	71,25	57,75	23,75
CTC	mmolc dm <sup>-3</sup>	76,00	51,75	221,50	93,00	97,50	60,00
V	%	52	28	89	77	59	40
S	mg dm <sup>-3</sup>	3,75	2,50	6,50	7,25	3,25	3,00
B	mg dm <sup>-3</sup>	0,27	0,23	0,41	0,22	0,23	0,21
Cu	mg dm <sup>-3</sup>	0,60	0,40	3,35	1,08	0,93	0,80
Fe	mg dm <sup>-3</sup>	143,88	36,63	127,75	48,38	137,88	71,50
Mn	mg dm <sup>-3</sup>	8,25	1,20	6,13	0,73	4,55	0,70
Zn	mg dm <sup>-3</sup>	3,10	3,03	5,15	1,83	2,70	1,98

Fonte: Autora (2025).

Legenda: Na horizontal: Superficial (SP), Subsuperficial (SB), mata (MT), sistema agroflorestal (SAF), pastagem (PAST); na vertical: Matéria Orgânica do Solo (MOS), Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), saturação por bases (V).

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método da pipeta, empregando solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 N como agente dispersante e submetendo as amostras à agitação mecânica em equipamento de alta rotação durante 10 minutos. A fração argila foi obtida por sedimentação, enquanto a fração areia foi separada por peneiramento; o teor de silte foi estimado pela diferença entre os valores de argila total e areia total. Para a determinação da Argila Dispersa em Água (ADA), utilizou-se o mesmo procedimento, porém sem a adição do dispersante químico. Com os resultados de Argila Total (AT) e ADA, calculou-se o índice de floculação (IF) por meio da equação 1:

(1)

$$IF (\%) = \frac{AT - ADA}{AT} \times 100$$

Onde:

AT = Argila Total (obtida com dispersão química e mecânica);

ADA = Argila Dispersa em Água (sem uso de dispersante).

A estabilidade dos agregados foi avaliada por meio do peneiramento úmido, empregando um conjunto de peneiras com diâmetros de 4,76 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 0,25 mm, 0,105 mm e < 0,105 mm, conforme descrito por Kemper e Chepil (1965). Os resultados foram apresentados como porcentagem de agregados estáveis nas classes > 2 mm, entre 2 e 1 mm, e < 1 mm. O diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados foi determinado seguindo a equação 2, proposta por Schaller e Stockinger (1953).

(2)

$$DMG = 10^{\frac{\sum_{i=1}^N n_i \log D_i}{\sum n_i}}$$

Em que:  $n_i$  se refere aos agregados, em porcentagem, retidos em determinada peneira,  $D_i$  é o diâmetro médio da peneira e  $N$  seu número de classes.

O Diâmetro Médio Ponderado (DMP) foi obtido por meio do método de Kemper e Rosenau (1986), disposto na equação 3.

(3)

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$$

Em que:

$x_i$  = diâmetro médio da classe de agregados e  $w_i$  = fração de massa dos agregados retidos na classe  $i$ , sendo, conforme Kemper e Rosenau (1986):

(4)

$$w_i = \frac{\text{massa da classe } i}{\text{massa total}}$$

### b) Atributos físico-hídricos do solo

O Índice de Cone (IC) foi obtido através de penetrômetro digital modelo Falker PenetroLOG, de esforço manual (Figura 7), regulando o equipamento para perfil de compactação de 0 a 60 cm e utilizando a haste tipo 2 (conforme norma American Society of Agricultural Engineers - ASAE S313.3), em 4 replicatas por repetição.

**Figura 7.** Obtenção dos dados de Resistência à Penetração (RP) com o penetrômetro digital penetroLOG – medidor eletrônico de compactação do solo



Foto: Autora (2025)

A avaliação da condutividade hidráulica não saturada ( $K_{\theta}$ ) nas 12 parcelas foi realizada utilizando o mini-infiltrômetro de disco do fabricante Decagon Devices (Figura 8). O equipamento é um tubo graduado (mL) que possui duas câmaras e uma base porosa. A câmara superior, cheia de água, exerce uma sucção conhecida (ajustada de acordo com o ambiente) e a inferior permite a infiltração da água no solo. O disco de aço inoxidável controla o fluxo de água de acordo com a sucção (Meter Group, 2021). A sucção utilizada foi a de -2 cm, anotando-se o volume de água à altura do menisco a cada 30s, por 15 minutos. A  $K_{\theta}$  foi estimada conforme Zang (1997), por meio da equação 5:

(5)

$$K = C_1 \cdot A^{-1}$$

Em que C1 representa a inclinação da curva da infiltração cumulativa e A é a relação dos parâmetros de Van Genuchten de acordo com o tipo de solo, que determina a taxa de sucção empregada e o raio do disco poroso utilizado, conforme Meter Group (2021) e Carsel e Parrish (1988).

**Figura 8.** Obtenção dos dados de infiltração através do mini-infiltrômetro de disco no ambiente de mata e desenho do equipamento

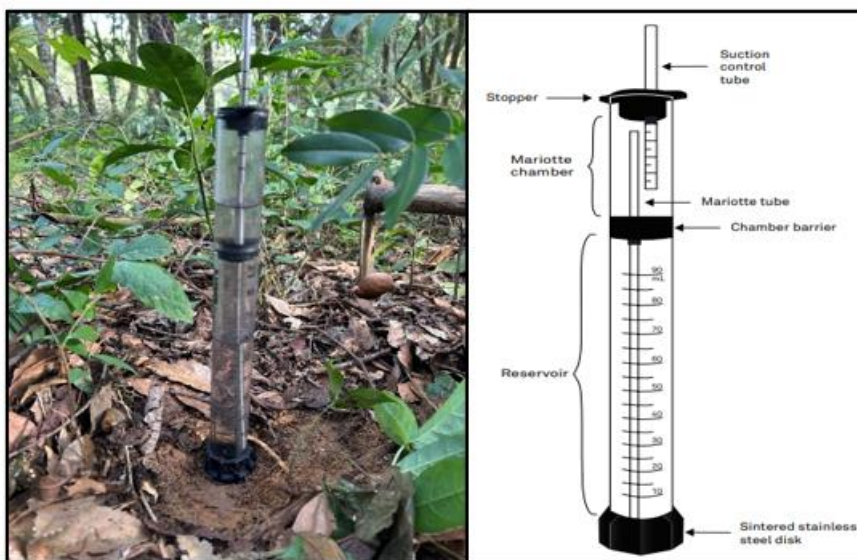


Foto: Autora (2025); Meter Group (2021).

### 3.4 Elaboração de metodologia e avaliação dos indicadores visuais de qualidade do solo

A definição dos indicadores para a elaboração e avaliação da qualidade visual do solo foi realizada com base em várias metodologias, combinando VSA (Shepherd, 2000) e VESS (Ball; Batey; Munkholm, 2007) e os estudos de Nicholls *et al.* (2004), Marques (2014) e Souza *et al.* (2016). Para a escolha, foram preconizados indicadores que melhor se enquadrassem nas condições de solo e manejo locais, tivessem fácil aplicação e compreensão, além de demandar materiais localmente disponíveis. 20 volumes. Adotou-se o sistema de atribuição de notas (pontuação ou *score*), cuja escala se baseou na metodologia de Nicholls *et al.* (2004): (0) revela uma condição pobre; (1) é a condição intermediária e (2) é uma condição boa. Essa escala foi adotada por ser simplificada, possuindo apenas três variações, o que facilita o

entendimento e diferenciação das condições de qualidade do solo em campo. A cada indicador atribuiu-se ponderação, conforme sua ordem de importância em relação à qualidade, baseando-se em Souza *et al.* (2016). O conjunto de indicadores e sua respectiva ponderação estão representados no Quadro 1.

**Quadro 1.** Indicadores visuais de qualidade do solo, seus respectivos testes de campo e classificação por meio de escores.

N°	Propriedade	Teste de campo	Pontuação	Ponderação	Autoria do método
1	Compactação	Abertura manual de pequena trincheira com 0,4x0,4m. Inferir pequena força ao solo com auxílio de uma faca.	(0) Presença de camada compactada, com ausência de macroporos e resistência sentida na ponta da faca; (1) Presença de camada compactada com fissuras e alguns macroporos; (2) Ausência de camada compactada, solo com porosidade por todo o perfil.	3	Adaptado de Ball et al. (2007), Niero <i>et al.</i> (2010) e Marques (2014).
2	Compactação	Inferir pequena força ao solo com auxílio de um arame.	(0) Solo endurecido, pobre em matéria orgânica, onde, ao tentar penetrar um arame, este se dobra facilmente; (1) O solo aparenta ter pouca matéria orgânica, com alguma dificuldade de penetração do arame; (2) O solo é macio, aparenta ter boa quantidade de matéria orgânica, onde o arame penetra sem dificuldade.	3	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016) e Nicholls <i>et al.</i> (2004).
3	Porosidade e compactação	Derramar 500 mL de água sobre o solo e observar	(0) A água infiltra lentamente do início ao fim, carreando partículas consigo; (1) A água infiltra em velocidade moderada, havendo retenção hídrica razoável; (2) Há boa retenção ou infiltração de água, sem carregamento de partículas.	3	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016) e Nicholls <i>et al.</i> (2004).
4	Estabilidade dos agregados na água	Dispor um agregado de 20mm em um copo de 200 mL com água, agitar por alguns segundos e observar por 5 minutos.	(0) O agregado se dissolve, sobrando poucos torrões pequenos, e a solução (água) fica com aspecto turvo; (1) O agregado perde pouco a sua forma inicial; (2) O agregado praticamente não perde o formato, com pouca ou nenhuma turbidez da solução.	3	Adaptado de Marques (2014) e FAO (2025).
5	Susceptibilidade à erosão	Observação do solo.	(0) Há muitos sulcos e valetas que não podem ser corrigidos, ausência de vegetação; (1) Os sulcos e valetas podem ser corrigidos com preparo de solo, há pouca vegetação e solo exposto; (2) Não há sulcos ou valetas, o solo possui boa cobertura vegetal.	3	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016) e Nicholls <i>et al.</i> (2004).

N°	Propriedade	Teste de campo	Pontuação	Ponderação	Autoria do método
6	Estrutura e consistência	Observação do solo.	(0) O solo se assemelha à areia, sem formação de estrutura e agregados; (1) O solo forma agregados, que apresentam alguma resistência à quebra; (2) Há muitos agregados, que se quebram facilmente com pouca pressão.	3	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016).
7	Avaliação da serapilheira	Observação do solo	(0) Não há serapilheira; (1) Presença razoável de serrapilheira, parcialmente incorporada e decomposta na superfície do solo; (2) Há boa quantidade de serapilheira, bem decomposta, com resíduos em diferentes estágios de decomposição e boa incorporação ao solo.	2	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016), Melloni <i>et al.</i> (2008) e Nicholls <i>et al.</i> (2004).
8	Presença de fauna no solo (formigas, minhocas, gafanhotos etc.)	Observação do solo	(0) Não se localizam indícios de fauna no solo como canais, dejetos e resíduos orgânicos; (1) Há indícios de fauna, mas pouca presença efetivamente; (2) Há abundante presença de fauna e seus indícios.	1	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016) e Nicholls <i>et al.</i> (2004).
9	Cor e odor do solo	Observação do perfil e exalação de amostras de solo.	(0) Solo pálido, com indícios de pouca matéria orgânica e cheiro mineral; (1) Solo com coloração intermediária, com cheiro levemente "fresco", semelhante ao húmus; (2) Solo com horizonte superficial escuro, indicando maior presença de matéria orgânica, com cheiro de matéria fresca, semelhante ao cheiro de húmus.	1	Adaptado de Shepherd (2009), Penning <i>et al.</i> (2015), Primavesi (2009) e FAO (2025).
10	Atividade microbiológica	Submeter 100 mL de solo a 30 mL de peróxido de hidrogênio (água oxigenada) e observar a formação de bolhas.	(0) Pouca ou nenhuma efervescência; (1) Efervescência leve; (2) Efervescência significativa, com formação de várias bolhas.	2	Adaptado de Arruda <i>et al.</i> (2012), Marques (2014) e Nicholls <i>et al.</i> (2004).
11	Presença e orientação das	Abertura de uma pequena trincheira de	(0) Há poucas raízes vivas com engrossamento ou crescimento torto, horizontal ou pouco profundo. Se	2	Adaptado de FAO (2025).

N°	Propriedade	Teste de campo	Pontuação	Ponderação	Autoria do método
	raízes	0,4x0,4x0,4m. Observar a disposição das raízes no bloco de solo extraído e dentro da trincheira.	leguminosas, apresentam pouca ou nenhuma nodulação, há pouca biomassa; (1) As raízes estão em boa quantidade, crescem na orientação vertical, possuem ramificações e pilomas; (2) As raízes são abundantes, crescem verticalmente, possuem muitas ramificações e pilomas, com alta quantidade de biomassa. Nas leguminosas, há abundante nodulação.		
12	Infestação de plantas espontâneas.	Observação do solo.	(0) Não há plantas espontâneas ou há predomínio de poucas espécies; (1) Há plantas espontâneas, com variedade intermediária de espécies; (2) Há plantas espontâneas em quantidade e boa variedade de espécies.	1	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016) e Nicholls <i>et al.</i> (2004).
13	Cobertura do solo	Observação do solo.	(0) Solo exposto: é possível enxergar praticamente todo o solo; (1) Menos da metade do solo está coberta (cobertura viva ou resíduos); (2) Mais da metade do solo possui cobertura viva ou resíduos.	3	Shepherd (2000), Penning <i>et al.</i> (2015).
14	Pedregosidade	Observação do solo.	(0) Solo muito pedregoso (mais da metade do material é composta por rochas e/ou fragmentos); (1) Há alguma pedregosidade, porém, é menor que 50% do material; (2) ausência de pedregosidade.	2	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016).
15	Profundidade	Observação do solo após abertura de pequena trincheira (0,4x0,4m).	(0) O subsolo fica exposto, não há camada superficial; (1) A camada superficial possui entre 20 e 40 cm; (2) O solo possui camada arável superior a 40 cm.	2	Adaptado de Souza <i>et al.</i> (2016).

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos estudos mencionados.

A avaliação visual da qualidade do solo foi realizada no dia 10/07/2025, em todas as repetições das três áreas de estudo. Os materiais necessários foram enxadão, cavadeira, garrafa de água de 500 mL, um pacote de copos descartáveis de 200 mL, água, dois arames de aço de 2mm de espessura, uma faca com ponta e dois frascos de peróxido de hidrogênio (água oxigenada) 20 volumes.

### 3.5 Análise dos dados

Os atributos indicadores físicos e químicos do solo obtidos pelos métodos laboratoriais convencionais foram avaliadas, a partir de quatro repetições (n=4) por tratamento. São eles: frações granulométricas do solo (argila, areia e silte), porcentagem de Argila Dispersa em Água (ADA); Índice de Flocculação (IF); Condutividade Hidráulica Não Saturada ( $K_{\theta}$ ); Diâmetro Médio Geométrico dos agregados (DMG); Diâmetro Médio Ponderado dos agregados (DMP); Índice de Cone (IC) e Matéria Orgânica do Solo (MOS). A normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias foram testadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, ambos a  $p < 0,05$ , respectivamente. Quando estes pressupostos não foram atendidos, foi utilizada a função Box-Cox. Em seguida uma análise de variância (ANOVA) foi aplicada a fim de compreender o efeito dos tratamentos sobre as variáveis dependentes, e quando a hipótese nula foi rejeitada pelo teste F, as médias foram testadas pelo teste Duncan ( $p < 0,05$ ). Adicionalmente, aplicou-se uma análise de correlação de Pearson para compreender as correlações (positivas e negativas) entre os atributos avaliados. A sistematização estatística foi desenvolvida utilizando o software R, versão 4.3.3 (R Core Team, 2023), incluindo pacotes *tidyverse* (Wickham *et al.*, 2019), *corrplot* (Taiyun; Viliam, 2021), *MASS* (Venables *et al.*, 2002), *ExpDes.pt* (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2021), e *Hmisc* (Harrell Junior; Dupont, 2025). Com os dados de resistência à penetração e IC foi elaborado um perfil de penetrometria, utilizando o software SigmaPlot 11.0 (SystatSoftware Inc., 2007).

A ponderação dos indicadores visuais baseou-se na metodologia RAQS (Souza *et al.*, 2016). Nela, a cada um deles é atribuída uma ordem de importância de 1 a 3. As maiores ponderações (3) relacionam-se à estrutura do solo, compreendendo sua agregação, estabilidade e susceptibilidade à erosão. A ponderação intermediária (2) se refere a fatores indiretamente influenciados pela estrutura do solo, como por exemplo, a atividade biológica e a orientação das raízes. A menor ponderação (1) se

refere a fatores mais indiretos na indicação da qualidade (como variedade de plantas espontâneas) e com maior subjetividade, como cor e odor do solo. O Índice de Qualidade Visual (IQV) e o Índice de Qualidade Visual Relativa (IQV 100) e déficit de qualidade visual foram calculados através da metodologia de Souza *et al.* (2016), com auxílio do software Excel.

### **3.6 Subsídios para elaboração do guia de qualidade do solo**

O guia, aqui chamado de “**Diagnóstico Visual da Qualidade do Solo: Um Guia Prático ao Agricultor Familiar**”, baseou-se nos conceitos de qualidade do solo apresentados na revisão de literatura, nas avaliações visuais realizadas nesta pesquisa e na metodologia InPaC-S (Integração Participativa de Conhecimentos sobre Indicadores de Qualidade do Solo) (Barrios; Coutinho; Medeiros, 2011). A escolha dos conteúdos pautou-se nos princípios de usabilidade, praticidade, facilidade de aplicação, disponibilidade de material e menor custo possível. Procurou-se adaptar a linguagem considerando o baixo nível tecnológico do público-alvo (agricultores familiares), visando uma comunicação clara, concisa e didática.

Além da escolha da comunicação verbal mais adequada ao público, empregou-se o máximo possível de imagens e ilustrações obtidas durante o experimento, de forma a propiciar maior assimilação pelos produtores rurais. Os procedimentos possuem suas respectivas imagens, facilitando ao produtor implantar o passo-a-passo da avaliação em sua propriedade. Isso foi realizado com objetivo de propiciar que qualquer pessoa possa compreender e aplicar o método.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores químicos e físicos, obtidos por métodos analíticos

A análise química do solo, apresentada na caracterização das áreas, demonstrou que o tipo de manejo influenciou nos indicadores de qualidade do solo. O sistema agroflorestal apresentou o maior teor de fósforo, potássio e cálcio, influenciado pelo manejo e adubação, não possuindo saturação por alumínio. O teor de matéria orgânica foi o maior entre os tratamentos, o que se explica pela constante deposição de resíduos vegetais e animais na área.

Os resultados das análises dos atributos físicos de cada tratamento estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores médios dos atributos do solo obtidos para as camadas superficial (SP) e subsuperficial (SB) e respectiva análise estatística para os tratamentos.

Atributos	Horizonte/ Camada de solo	MT	SAF	PAST	Estatística		
					Valor-p	Shapiro-p	CV (%)
Argila (%)	A/SP	14,88 aB	14,62 bB	23,62 aA	<0,001	p > 0,05	6,9
	Bt/SB	15,38 aC	23,62 aA	20,38 bB	<0,001	p > 0,05	3,6
Areia (%)	A/SP	75,20 aA	59,77 aB	54,53 aB	<0,001	p > 0,05	7,3
	Bt/SB	74,67 aA	54,53 aB	61,25 aB	<0,001	p > 0,05	7,0
Silte (%)	A/SP	9,93 aB	25,60 aA	21,85 aA	<0,01	p > 0,05	23,3
	Bt/SB	9,95 aB	21,85 aA	18,38 aA	<0,05	p > 0,05	26,7
ADA (%)	A/SP	5,12 aA	5,00 bA	5,12 aA	Ns	p > 0,05	30,7
	Bt/SB	6,62 aB	13,00 aA	5,38 aB	<0,001	p > 0,05	20,7
IF (%)	A/SP	65,6 aA	66,33 aA	78,40 aA	Ns	p > 0,05	10,9
	Bt/SB	56,85 aB	44,77 bB	73,75 aA	<0,01	p > 0,05	14,9
K <sub>θ</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	A/SP	7,68E-04	5,21E-04	3,85E-04	Ns	p > 0,05	47,6
	Bt/SB	1,83 aA	1,31 aAB	0,74 aB	<0,05	p > 0,05	47,6
DMG (mm)	A/SP	0,48 bA	0,27 bB	0,23 bB	<0,05	p > 0,05	36,3
	Bt/SB	3,38 aA	2,69 aA	1,97 aA	Ns	p > 0,05	28,6
DMP (mm)	A/SP	1,45 bA	0,61 bB	0,69 bB	<0,001	p > 0,05	25,9
	Bt/SB	1030 bA	599 bB	958,25 aA	<0,01	p > 0,05	24,2
IC (kPa)	A/SP	1915 aA	1030 aB	2219,50 bA	<0,001	p > 0,05	14,4
	Bt/SB	29,5 aC	55,5 aA	38,5 aB	<0,001	p > 0,05	9,6
MOS (g.dm <sup>-3</sup> )	A/SP	9,78 bB	11,5 bB	15,0 bA	<0,001	p > 0,05	10,9

Fonte: Autora (2025).

Legenda: Análise dos atributos do solo para os tratamentos mata (MT), sistema agroflorestal (SAF) e pastagem (PAST), dentre os quais Argila (%), Areia (%) e Silte (%) correspondem às frações

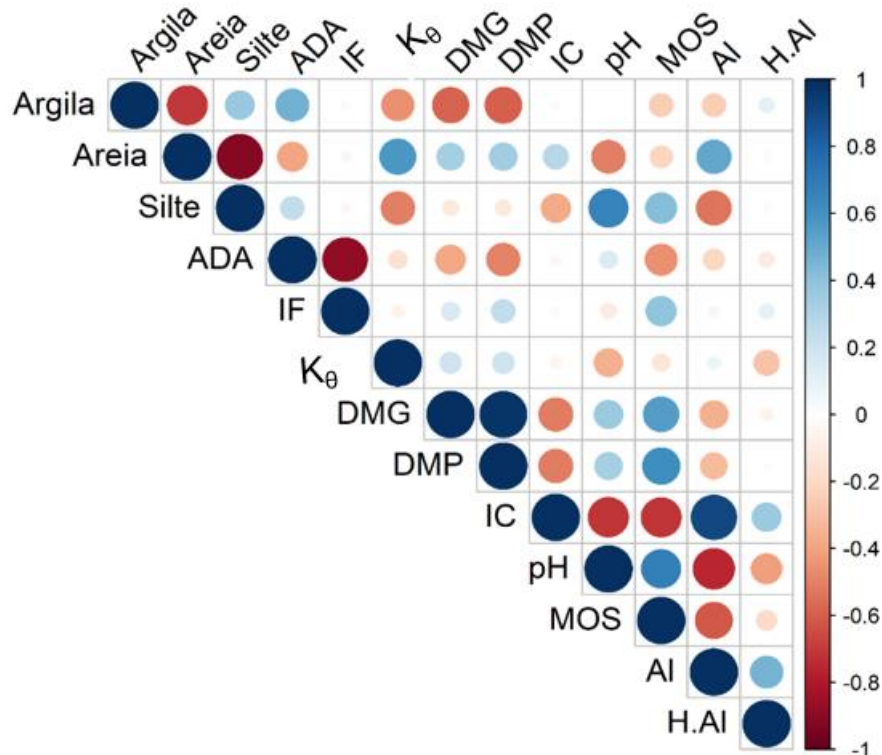
granulométricas do solo; ADA = Argila Dispersa em Água (%); IF = Índice de Floculação (%);  $K_{\theta}$  = Condutividade Hidráulica Não Saturada ( $\text{cm.s}^{-1}$ ); DMG = Diâmetro Médio Geométrico dos agregados (mm); DMP = Diâmetro Médio Ponderado dos agregados (mm); IC = Índice de Cone (kPa); pH = potencial hidrogeniônico (unidade adimensional); MOS = Matéria Orgânica do Solo ( $\text{g.dm}^{-3}$ );  $\text{Al}^{3+}$  = Alumínio trocável ( $\text{mmolc.dm}^{-3}$ ), Coeficiente de Variação (CV). Letras maiúsculas representam a comparação horizontal (entre tratamentos), e letras minúsculas comparam verticalmente (em profundidade) no mesmo tratamento pelo teste Duncan a  $p < 0.05$ .

Os dados da Tabela 2 apresentam a granulometria dos solos nos diferentes ambientes. Na camada mais superficial, o teor de argila total foi significativamente maior na área de pastagem em relação ao SAF e à mata, ambos sem diferenças significativas. Já na camada subsuperficial, todos os tratamentos diferiram entre si. O SAF apresentou a maior porcentagem da fração argila, seguido da pastagem e mata, respectivamente. Não houve diferenças estatísticas no teor de argila entre camadas no tratamento MT, por outro lado, se observou incrementos de argila em profundidade, nos tratamentos SAF e PAST.

Os maiores teores de areia total foram encontrados no ambiente com mata nativa, nas duas camadas avaliadas, sendo estatisticamente superior quando comparado com os ambientes com SAF e PAST. Observou-se, adicionalmente que não houve diferença do conteúdo de areia entre camadas em nenhuma das áreas de estudo. Esta homogeneidade do conteúdo de areia total até a camada de 20 cm, provavelmente se deve às características intrínsecas do Argissolo Vermelho-Amarelo, confirmada pela ausência de significância entre as camadas avaliadas, em todos os tratamentos. Além disso, o maior teor de areia, em relação ao silte e argila, também é justificado pela classe de solo estudada, a qual apresenta um gradiente textural, porém com acúmulo de areia nas camadas mais superficiais (Santos *et al.*, 2025).

Quanto ao teor de silte, a área de mata apresentou menor média, enquanto SAF e PAST são semelhantes entre si. Os menores teores de silte em mata podem ser explicados pelos maiores conteúdos de areia nessa área, uma vez que essas variáveis apresentaram correlação negativa (Figura 9). Entre profundidades, não houve diferença significativa.

**Figura 9.** Matriz de correlação de Pearson entre alguns dos atributos físicos e químicos estudados



Fonte: Autora (2025)

Legenda: ADA = Argila Dispersa em Água (%); IF = Índice de Floculação (%);  $K_{\theta}$  = Condutividade Hidráulica Não Saturada ( $\text{cm s}^{-1}$ ); DMG = Diâmetro Médio Geométrico dos agregados (mm); DMP = Diâmetro Médio Ponderado dos agregados (mm); IC = Índice de Cone (kPa); pH = potencial hidrogeniônico (unidade adimensional); MOS = Matéria Orgânica do Solo ( $\text{g dm}^{-3}$ ); Al = Alumínio trocável ( $\text{mmolc dm}^{-3}$ ). Matriz de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo.

A Argila Dispersa em Água (ADA) não diferiu estatisticamente entre os tratamentos na camada superficial. Por outro lado, na camada subsuperficial, o SAF apresentou maior ADA. Entre os tratamentos, o SAF é o mais argiloso na camada subsuperficial (Tabela 2). O resultado encontrado de maior ADA acompanhou a diminuição significativa de MOS na subsuperfície deste tratamento. Isso demonstra que, no SAF, ainda que haja maior aporte de MOS em superfície, a camada subsuperficial tem maior susceptibilidade à dispersão. No entanto, o manejo utilizado pelo produtor mantém o solo coberto, o que pode minimizar essa tendência.

O Índice de Floculação (IF) foi estatisticamente igual entre os tratamentos na camada mais superficial. Porém, na subsuperficial, a pastagem apresentou o maior IF, enquanto MT e SAF não diferiram entre si (sendo numericamente menores).

Apesar de a adição de matéria orgânica promover a formação de agregados e aumentar o índice de floculação (IF), melhorando a estrutura do solo e a infiltração de água, no caso da área sob pastagem, a textura do solo (maior teor de argila e silte) pode ter influenciado diretamente sua capacidade de floculação. Solos com maior teor de argila têm propriedades de floculação mais distintas (Teixeira *et al.*, 2017; Abbaslou; Hadifard; Ghanizadeh, 2020).

O Diâmetro Médio Geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados amplamente utilizado como um indicador de qualidade estrutural do solo (Madari, 2004), apresentou valores mais elevados no ambiente com floresta nativa (MT), nas duas camadas avaliadas. Na camada superficial, apenas o SAF apresentou resultados iguais aos da área de mata, enquanto no tratamento PAST, houve um decréscimo significativo de DMG em todas as camadas quando comparado à MT.

Embora se note um ligeiro decréscimo do Diâmetro Médio Ponderado (DMP) em SAF e PAST, quando comparado à MT, esses valores não foram diferentes estatisticamente na camada superficial, enquanto na subsuperficial, foi observado que o ambiente de SAF e PAST causaram diminuição no DMP, quando comparado com a mata. Os resultados sinalizam diminuição do DMP e DMG em profundidade em todas as áreas estudadas. Isso reflete a alta correlação entre DMG e DMP, os quais são amplamente utilizados como indicadores de qualidade do solo. A análise integrada desses atributos melhora o entendimento do impacto do uso e manejo dos solos sobre sua qualidade e/ou saúde física, corroborando o estudo de Loss *et al.* (2009).

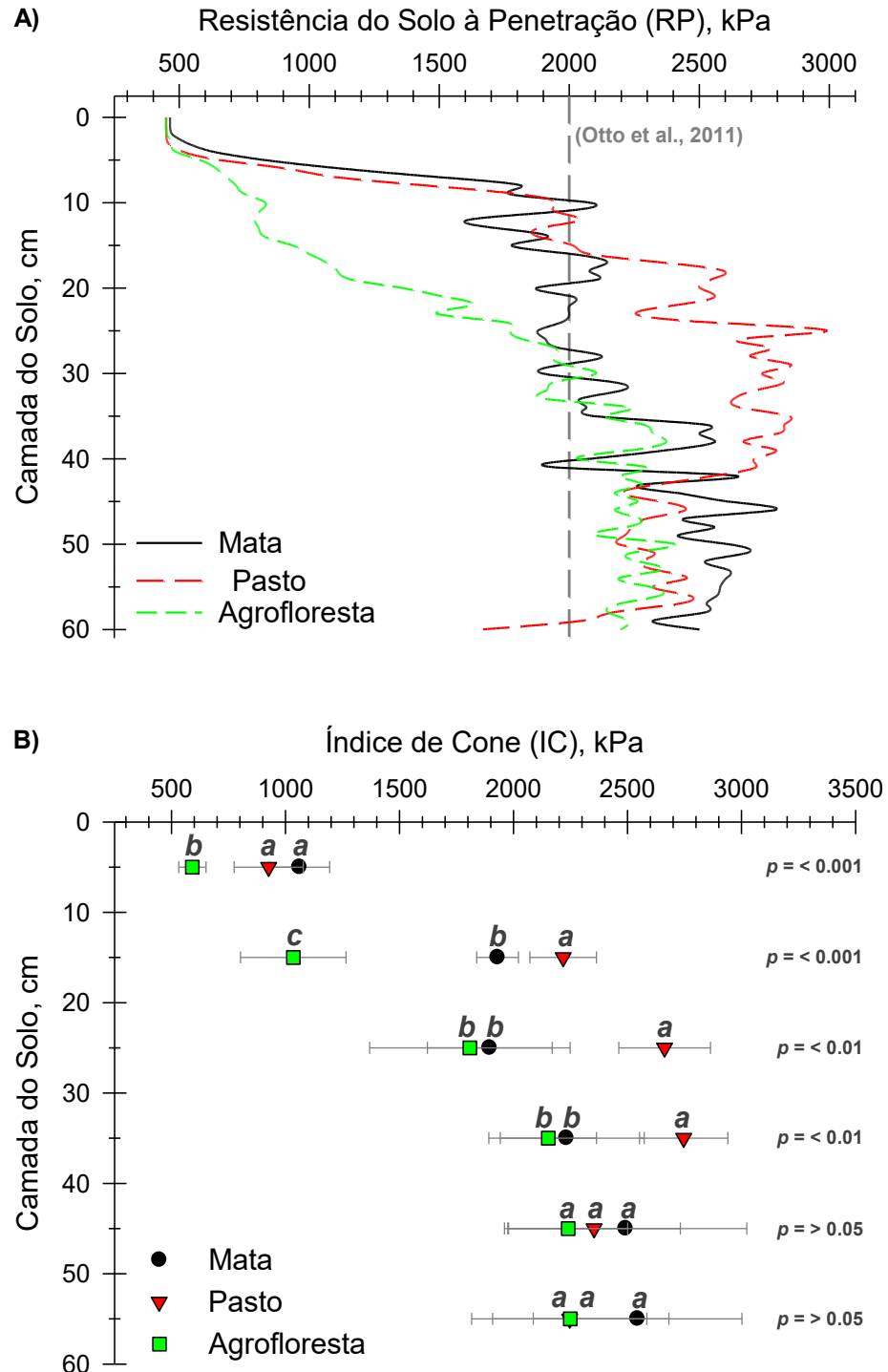
A condutividade hidráulica não saturada ( $K_{\theta}$ ) demonstrou que a mata possui a maior capacidade de infiltração de água no solo, seguido pelo sistema agroflorestal e a pastagem, respectivamente. Embora seja possível identificar ligeiras variações entre as médias, essas foram estatisticamente diferentes. O maior valor de  $K_{\theta}$  ( $7,68e-04 \pm 4,08e-04$ ) ratifica a correlação entre esses atributos e o maior conteúdo de areia observado nesse ambiente (Figura 9). Esses resultados corroboram com os reportados por Fahmy (1961) e Cavalcante, Fernandez e Reichardt (2018), os quais também observaram essa significativa correlação positiva, que permite observar maior infiltração quando os solos são mais arenosos.

A Matéria Orgânica do Solo (MOS) diferiu estatisticamente entre os tratamentos na camada mais superficial, sendo o SAF o ambiente com maior MOS em relação à pastagem e mata, respectivamente (Tabela 2). Na camada subsuperficial, também houve diferenças entre os tratamentos, entretanto, o teor de MOS foi menor

comparado à camada mais superficial em todas as áreas. Esses resultados se explicam, em parte, porque as texturas nos solos avaliados são diferentes, diferindo inclusive em profundidade. Observa-se que, na mata, a quantidade de areia em superfície é maior, enquanto a pastagem tem mais argila. Essa variação pode contribuir para os resultados encontrados, pois, embora a textura seja intrínseca ao solo e não seja afetada pelo manejo, a granulometria interfere no teor de MOS. Quanto maior o teor de argila, mais favorável é o acúmulo de MOS pela microbiota (Resende *et al.*, 2002; Angst *et al.*, 2021), o que explica o teor de MOS na pastagem (mais argiloso) ser numericamente maior ao da mata (mais arenoso) em superfície.

A Figura 10 apresenta o perfil de penetrometria com base nos resultados da resistência do solo à penetração (RP) e do índice de cone (IC) calculados para camadas de 10 cm até a profundidade de 60 cm.

**Figura 10.** Resistência do solo à penetração (A) e índice de cone (B) para os tratamentos



Legenda. A) Perfil de penetrometria. A linha cinza tracejada indica o valor crítico de resistência à penetração (RP), acima do qual há restrição ao crescimento radicular, conforme indicado por Otto *et al.* (2011); B) Valores médios do índice de cone (IC).  $p$  = valor-p obtido na ANOVA (teste F). Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as médias, segundo o teste de Tukey.

Observa-se que a pastagem degradada (PAST) apresentou os maiores valores de resistência em praticamente todo o perfil, superando o limite crítico de 2.000 kPa proposto por Otto *et al.* (2011), acima do qual há restrição ao crescimento radicular. Esse resultado evidencia elevado grau de compactação/degradação da estrutura do solo, com provável redução da infiltração de água, dos índices estruturais (DMG e DMP) e do teor de MOS, com reflexos no ADA e no IF, quando comparado aos tratamentos MT avaliados na área de mata e agrofloresta (Tabela 2). Resultados semelhantes sobre o impacto da pastagem em ambientes protegidos foram relatados por Iori e Ramos *et al.* (2014). Tal comportamento pode ser atribuído ao pisoteio animal e à não adoção de manejo conservacionista, fatores que comprometem a estrutura do solo, conforme Dias Júnior e Silva (2013) e Ramos *et al.* (2014).

Em contrapartida, o sistema agroflorestal (SAF), área 3, apresentou menores valores de RP, especialmente até 30 cm de profundidade, indicando melhor estrutura física e maior friabilidade. Essa condição é resultado da ação das raízes de diferentes espécies e da ciclagem de matéria orgânica, o que favorece a agregação e a formação de bioporos (Hernani, 2021; Garland *et al.*, 2024). Salienta-se que, no SAF, ainda que haja alto aporte de matéria orgânica, o produtor utiliza enxada rotativa (profundidade de corte de 200mm) nas entrelinhas onde cultiva hortaliças. No entanto, ainda que o uso do equipamento possa ter alterado a RP de 0 a 20 cm, observa-se que o padrão da baixa resistência do solo à penetração se manteve entre 30 e 20cm e 30-60cm. A mata nativa apresentou valores intermediários, o que pode ser explicado pelo fato de que não há revolvimento superficial do solo. Além disso, salienta-se que, no local, esporadicamente transita um pequeno rebanho com três cabeças de gado, o que pode ter interferido nos resultados. Ainda assim, a área de pastagem ofereceu a maior RP a partir dos 15 cm de profundidade, indicando condições de degradação e compactação. Apesar da presença de uma granulometria mais fina (argila e silte) na área de pastagem, não se acredita que isto possa ter influenciado, significativamente, os resultados de resistência mecânica do solo à penetração.

O resultado do índice de cone (IC) reforça essa tendência e comportamento do perfil de penetrometria. As diferenças significativas ( $p < 0,001$ ) entre os sistemas nas camadas de 10 a 30 cm indicam que o tipo de uso e manejo exerce influência direta sobre a resistência mecânica do solo, reiterando a influência do pisoteio animal na área de pastagem. Na pastagem (área 2), o IC foi consideravelmente superior, refletindo condições de compactação e degradação estrutural. Já o SAF (área 3)

apresentou valores semelhantes aos da mata nativa nas camadas mais profundas, evidenciando que esse sistema mantém condições físicas e estruturais próximas às de um ambiente com menor interferência antrópica.

#### 4.2 Avaliação da qualidade do solo por indicadores visuais

O uso de indicadores visuais relacionados aos aspectos físicos, biológicos e químicos do solo, permitiu avaliar o estado de qualidade do solo nos três ambientes estudados, refletindo diretamente os efeitos do uso e manejo. As pontuações dos indicadores obtidas em cada parcela estão descritas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Pontuações da avaliação da qualidade visual do solo para a mata nativa (MT), sistema agroflorestal (SAF) e pastagem (PAST)

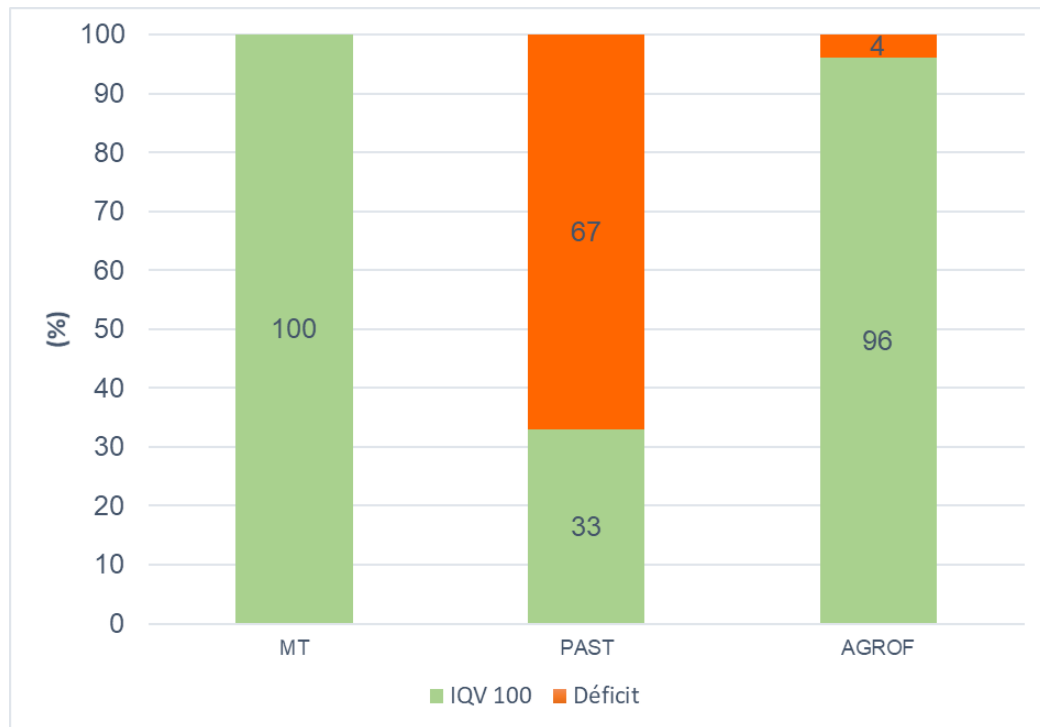
Indicador	MT					SAF				PAST			
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	
1 Compactação (ponta da faca)	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	
2 Compactação (ponta do arame)	1	1	1	1	2	2	2	2	0	0	0	0	
3 Porosidade e compactação	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	
4 Estabilidade dos agregados	2	2	2	2	0	2	1	2	0	0	0	0	
5 Susceptibilidade à erosão	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	
6 Estrutura e consistência	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
7 Avaliação da serapilheira	2	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	
8 Presença de fauna no solo	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	
9 Odor e cor do solo	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	
10 Atividade microbológica	1	1	1	1	2	2	2	2	0	0	0	0	
11 Presença e orientação das raízes	2	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	
12 Infestação de plantas espontâneas	2	2	2	2	1	2	1	2	0	0	0	0	
13 Cobertura do solo	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	
14 Pedregosidade	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
15 Profundidade	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	

Legenda: As notas variam de 0 a 2, sendo 0 a condição pobre, 1 a condição intermediária e 2 a condição boa (desejável). Fonte: Autora (2025).

Com base na Tabela 3, é possível inferir que, em valores numéricos, houve variações visuais entre os tratamentos. No entanto, a simples observação dos

números das avaliações não permite compreender claramente as diferenças entre os tratamentos. Portanto, organizaram-se as informações obtidas em formato de Índice de Qualidade Visual (IQV), conforme a metodologia de Souza *et al.* (2016), e apresentado na Figura 11.

**Figura 11.** Índice de Qualidade Visual (IQV) para cada tratamento

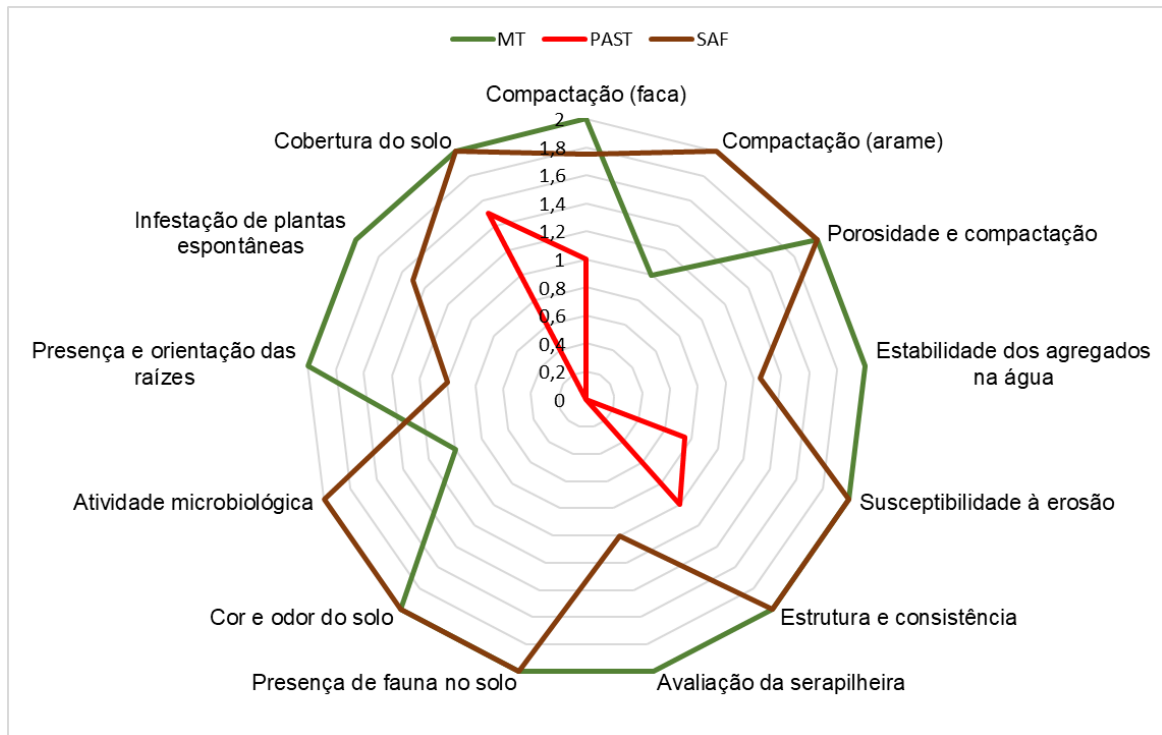


Legenda: Mata nativa (MT), pastagem (PAST), Sistema Agroflorestal (SAF), IQV (Índice de Qualidade Visual), Índice de Qualidade Visual Relativa (IQV 100). Fonte: Autora (2025).

Os dados da Figura 11 foram obtidos assumindo a área de mata nativa como sistema de referência. O sistema agroflorestal foi visualmente superior em qualidade do solo em relação à área de pastagem degradada, enquanto a mata nativa, ambiente com menor pressão de uso do solo e perturbação antrópica, apresentou maiores indicadores de qualidade em relação aos outros sistemas, representando um IQV 100% (referência). Enquanto isso, o sistema agroflorestal obteve IQV semelhante à área de mata, apresentando 4 pontos percentuais de déficit de qualidade visual. Já na área de pastagem, o déficit em relação à área de referência foi de 67%. Ou seja, a avaliação visual demonstrou fatores predominantemente degradantes em relação à qualidade do solo, sendo a pastagem aproximadamente 17 vezes pior que o SAF. Nesse sentido, infere-se que o IQV proporcionou um panorama geral sobre a QS em todos os sistemas, demonstrando que a metodologia, em geral, foi sensível às

diferenças de manejo empregadas nos diferentes tratamentos. A partir disso, para demonstração detalhada de cada indicador, dispuseram-se os dados em formato de gráfico radial, conforme metodologia de Nicholls *et al.* (2004) (Figura 12).

**Figura 12.** Gráfico radial da avaliação visual da qualidade do solo para os três ambientes a partir da média ponderada



Fonte: Autora (2025).

A Figura 12 permite observar que a mata nativa é o ambiente com menor pressão de uso, por sua mínima perturbação antrópica. Os indicadores de qualidade revelaram se tratar de um ambiente visualmente melhor, principalmente em relação aos físicos. Cherubin *et al.* (2016) obtiveram indicadores semelhantes em uma área de mata nativa, com pastagem e canavieira. Assim como obtido no presente trabalho, os autores observaram que a mata apresentou os maiores índices de qualidade do solo, sendo a pastagem o sistema mais degradado (com menor IQS).

Ainda sobre os parâmetros físicos, a compactação foi avaliada usando o arame (teste 1) e a ponta de uma faca (teste 2). Usando a faca, percebeu-se menor compactação da área de mata em relação ao SAF. Quando usado o arame, o resultado foi inverso (maior compactação na área de mata). No caso da pastagem, mesmo com as diferenças entre as formas de avaliação, verificou-se que foi a área

mais compactada. As diferenças entre os dois métodos se devem ao fato de que, embora avaliem compactação, a escala para avaliação possui parâmetros distintos. Quando se utilizou a ponta da faca (Figura 13), o perfil avaliado foi o da minitrincheira de 0,4 m e avaliaram-se presença de camada compactada, porosidade e resistência à força empregada com o objeto em toda a profundidade. Quando o teste foi realizado com o arame, a avaliação foi feita na vertical, sobre a camada superficial do solo (até onde a resistência à penetração permitia), ou seja, sobre o horizonte A, diferente daquele feito com facas abordando outros horizontes subjacentes. Além disso, os parâmetros foram dureza ou maciez do solo, aparência de matéria orgânica e resistência à penetração do arame. Embora haja diferenças metodológicas, os testes foram eficientes em detectar a degradação do solo, pois a área de pastagem foi visualmente inferior em ambos os procedimentos. Todavia, considerando a facilidade de com que o teste da ponta da faca avalia a compactação em profundidade, o teste com arame foi suprimido (até mesmo para evitar equívocos de interpretação pelo leitor).

**Figura 13.** Avaliação da resistência à penetração na ponta da faca ao longo do perfil (minitrincheira)



Foto: Autora (2025)

Esse resultado corrobora os dados de IQV obtidos para porosidade e compactação (teste 3), em que se observou a infiltração da água. Tanto na área de mata nativa quando no SAF houve boa retenção e infiltração de água, não havendo carreamento significativo de partículas visivelmente. No entanto, na pastagem foram observados os piores resultados para este parâmetro, em que houve carreamento de partículas em todas as repetições, resultando em um IQV nulo (igual a zero). A

dificuldade na infiltração de água em pastagens é observada em locais com pisoteio animal principalmente quando não são empregadas medidas de regeneração (Shepherd, 2009; Nabinger *et al.*, 2009).

Os resultados obtidos para estabilidade dos agregados na água demonstraram que a mata foi o sistema com maior pontuação, em que visivelmente os agregados sob agitação praticamente não sofreram desintegração. Na área de SAF, observou-se desagregação parcial dos pequenos torrões, enquanto nas amostras de pastagem houve total desintegração das amostras e turbidez da água. Os resultados obtidos para condição ruim (0), intermediária (1) e desejável (2) estão na Figura 14.

**Figura 14.** Desagregação das amostras de solo sob agitação em água



Legenda: **A.** (0) Condição pobre: o agregado se desfaz sob agitação, com destaque para turbidez da água; **B.** (1) Condição intermediária: O agregado se desfaz pouco sob agitação e água apresenta partículas de solo moderadamente; **C.** (2) Condição ótima: O agregado praticamente não perde a forma original, com destaque para a limpidez da água, que praticamente não apresenta carreamento de partículas. Foto: Autora (2025)

A partir da observação da Figura 14 e do gráfico radial (Figura 12), infere-se que houve sensibilidade da metodologia em detectar as diferenças entre os sistemas de manejo. O SAF apresentou menores médias ponderadas do que a mata nativa. Em parte, isso é explicado pelo fato de que, naquele sistema, é utilizada enxada rotativa

para preparação dos canteiros e leiras onde há cultivo de olerícolas e cereais. Embora haja constante incremento de matéria orgânica (através da cobertura de solo com maravalha, restos de poda e esterco animal), o revolvimento do solo rompe a cimentação das partículas de solo, reduzindo o diâmetro dos agregados e comprometendo a organização natural do sistema (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Com isso, há redução da proporção de agregados menores e de argila dispersa, os quais são carregados com maior facilidade quando há escoamento superficial (o que explica a turbidez da água). Um solo com menor resistência dos agregados à agitação na água é mais propenso à erosão hídrica (Castro Filho; Muzzili; Podanoschi, 1998), o que na área de mata nativa é menor. Ou seja, depreende-se que o método demonstrou visualmente que o não revolvimento do solo o torna menos vulnerável à desagregação e todos os processos decorrentes disto.

A susceptibilidade à erosão, também relacionada à agregação e estrutura do solo, foi visualmente maior na área de pastagem, onde havia pequenas valetas. O SAF e a área de mata nativa não apresentaram diferenças quanto aos indicadores visuais, devido ao solo estar coberto e não serem detectados sulcos e valetas. Este resultado corrobora os testes anteriores (estabilidade dos agregados sob agitação em água) e avaliação da resistência à penetração: o solo da pastagem, visualmente mais compactado, torna-se mais susceptível à erosão (Vezzani; Mielniczuk, 2011; Silva *et al.*, 2023). Outro parâmetro relacionado é a estrutura e consistência. A área de pastagem também recebeu a pior avaliação, em que foi possível observar a formação de agregados com resistência à quebra. Porém, nos sistemas onde há aporte de matéria orgânica (SAF e mata) houve maior pontuação (observaram-se muitos agregados, que se quebravam facilmente com pouca pressão). Este resultado explica-se pela atuação da matéria orgânica e dos organismos vivos (animais e raízes das plantas) em produzir substâncias cimentantes (Hernani, 2021), contribuindo para estruturação do solo, principalmente em condições tropicais.

Outro parâmetro relacionado à estrutura é a presença e orientação das raízes. Esse indicador respondeu de formas diferentes nos três sistemas (Figura 15). Na área mais compactada (pastagem), foi visível a exploração mais superficial do sistema radicular. Na área de mata e no SAF, a exploração compreendeu maior profundidade do solo, com mais ramificações. Um dos fatores que retarda o desenvolvimento radicular, alterando a arquitetura e exploração de raízes, é a resistência do solo (Correa *et al.*, 2019). Este resultado condiz com o encontrado nos testes de resistência

à penetração com o arame e a faca, em que a área de pastagem ofereceu maior resistência.

**Figura 15.** Presença e orientação das raízes

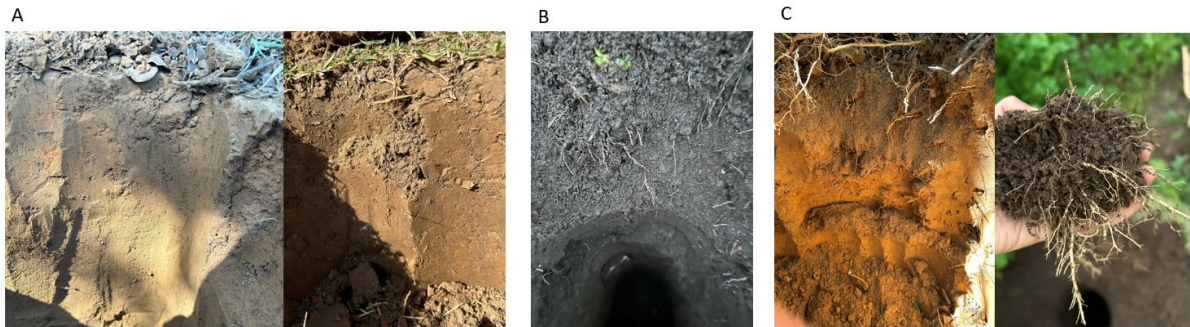


Foto: Autora (2025)

Legenda: **A.** (0) Condição pobre: Há poucas raízes vivas com engrossamento ou crescimento torto, horizontal ou pouco profundo. **B.** (1) Condição intermediária: As raízes estão em boa quantidade, crescem na orientação vertical, possuem ramificações e pilomas; **C.** (2) Condição ótima: As raízes são abundantes, crescem verticalmente, possuem muitas ramificações e pilomas, com alta quantidade de biomassa. Destaque para a abundância das ramificações radiculares encontradas na condição ideal.

A partir dos resultados encontrados, é possível inferir que a presença do sistema radicular pode ser utilizada como indicador de compactação da camada arável do solo, visto que foi sensível aos diferentes tipos de manejo. Outros autores também obtiveram correlação entre compactação e redução do enraizamento (Silva *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2025b), reforçando a eficiência do método. Todavia, deve-se considerar que problemas de enraizamento também podem estar relacionados a questões de fertilidade (como acidez e deficiências nutricionais) (Silva *et al.*, 2021).

Outro parâmetro relacionado aos aspectos físicos do solo foi a avaliação de presença de serapilheira. Nela, a mata foi o sistema com maior cobertura de material, havendo resíduos em diferentes estágios de decomposição (Figura 16), sendo realizada pelos microrganismos decompositores do solo (Grandi; Silva, 2006).

**Figura 16.** Presença de serapilheira e seus resíduos em decomposição



Foto: Autora (2025)

Legenda: **A.** (0) Condição pobre: ausência de serapilheira; **B.** (1) Condição intermediária: Presença razoável de serrapilheira, parcialmente incorporada e decomposta na superfície do solo; **C.** (2) Condição ótima: Há boa quantidade de serapilheira, bem decomposta, com resíduos em diferentes estágios de decomposição e boa incorporação ao solo. Destaque para decomposição do folheto por parte da microbiota decompositora do solo.

Conforme foi apresentado anteriormente, neste estudo considerou-se serapilheira como o material composto por cobertura morta em decomposição. Na área de mata, devido à presença das árvores nativas, a deposição de folheto em decomposição proporcionou a maior nota em todas as avaliações. Já no SAF, a nota foi intermediária, devido aos materiais (maravalha, resíduos de poda e de grama) estarem parcialmente decompostos. Na área de pastagem, não havia qualquer tipo de serapilheira, atribuindo-se a menor nota. Em relação à cobertura de solo, foi considerada a cobertura tanto de material vivo quanto morto, conforme revisão de literatura. Na Figura 17, tem-se demonstração das três condições envolvendo indicadores visuais.

**Figura 17.** Avaliação da cobertura de solo

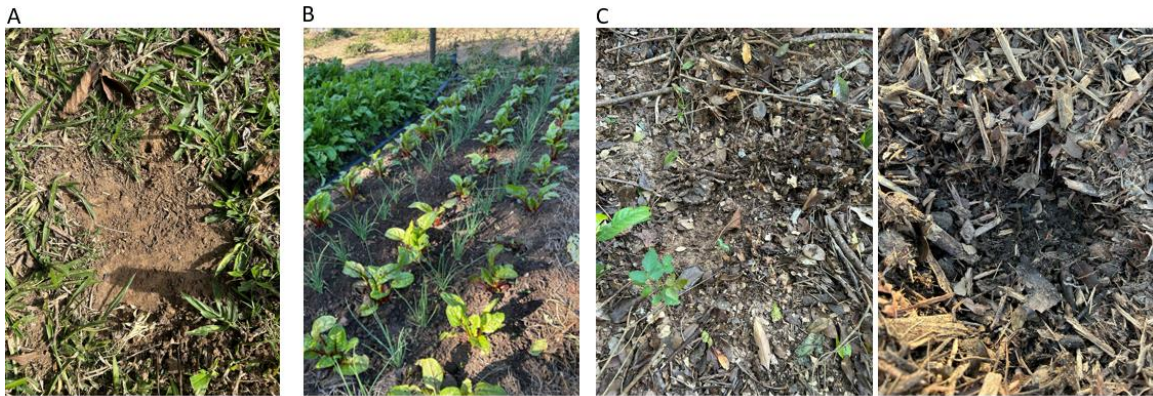


Foto: Autora (2025)

Legenda: (0) Condição pobre: Solo exposto: é possível enxergar praticamente todo o solo; (1) Condição intermediária: Menos da metade do solo está coberta (cobertura viva ou resíduos); (2) Condição ótima: Mais da metade do solo possui cobertura viva ou resíduos.

Nas condições deste estudo, não houve sensibilidade do indicador “cobertura de solo” porque, nos três sistemas avaliados, mais da metade do solo possuía cobertura viva ou resíduos, com exceção de um ponto da pastagem onde há solo exposto. A avaliação da serapilheira mostrou ser um indicador mais sensível, pois apresentou diferença gradual entre as diferentes pressões de uso do solo.

Outro parâmetro avaliado foi a cor do solo. As avaliações visuais demonstraram diferenças de coloração entre os sistemas, conforme Figura 18.

**Figura 18.** Avaliação da cor do solo nos três sistemas

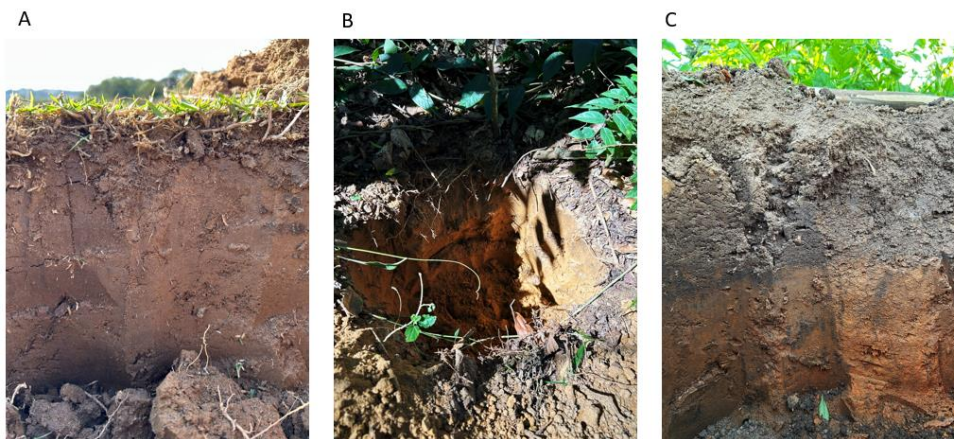


Foto: Autora (2025)

**A.** (0) Condição pobre: Solo pálido, com baixa matéria orgânica; **B.** (1) Condição intermediária: Solo com coloração intermediária; **C.** Condição ótima: (2) Solo com horizonte superficial escuro, indicando maior presença de matéria orgânica. Destaque para a nítida diferença de coloração entre o horizonte A e B.

A avaliação da cor demonstrou que, na área de pastagem, o perfil do solo possuía coloração mais pálida, baixa quantidade de resíduos vegetais em decomposição e pouca diferença de cor entre os horizontes. Na mata, havia nítida diferenciação entre a camada mais superficial, devido ao acúmulo de matéria orgânica oriunda de folheto e atividade da macro e microfauna (incluindo microrganismos) sobretudo entre 0-10 cm.

No sistema agroflorestal, o escurecimento da camada superficial foi ainda mais nítido. Isso se explica pela maior deposição de matéria orgânica através de restos de poda, maravalha e esterco animal, o que escurece o solo e contribui para diferenciação dos horizontes (Pinto *et al.*, 2025). Tais informações obtidas corroboram os resultados encontrados para odor, em que a inalação das amostras demonstrou, para a área de pastagem, um cheiro “mineral”, enquanto as áreas onde se notou maior escurecimento superficial do solo (SAF e área de mata nativa) se identificou cheiro de matéria fresca, semelhante ao odor de húmus. Conforme mencionado, tais parâmetros são mais subjetivos, recebendo menor peso (ponderação) no cálculo do IQV. No entanto, a diferença entre as amostras da pastagem e os demais sistemas foi perceptível pelo método.

A respeito dos indicadores biológicos, os resultados obtidos para presença de fauna demonstraram-se semelhantes à avaliação de cor e odor. No SAF e na mata atribuíram-se as maiores notas, sendo os sistemas com maiores indícios de macrofauna. Na área de pastagem, em todas as repetições praticamente não se localizaram indícios de fauna no solo como canais, dejetos e resíduos orgânicos. Nos outros sistemas, em todas as repetições foram encontrados indícios de macrofauna, conforme Figura 19.

**Figura 19.** Presença de anelídeos, gongolos e artrópodes de solo nos sistemas avaliados

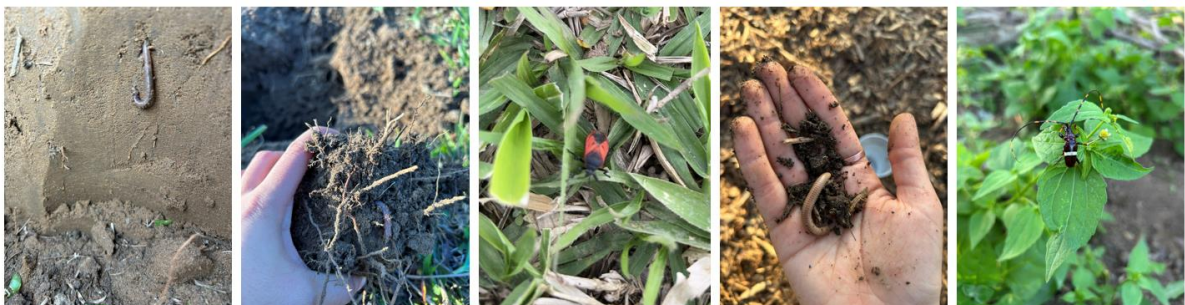


Foto: Autora (2025)

O resultado obtido explica-se pela relação do referido indicador com a matéria orgânica. Conforme Bray *et al.* (2019) e Erktan *et al.* (2020), a presença de macroinvertebrados e MO estão interligados, podendo estes organismos inclusive afetar a dinâmica do carbono e a agregação do solo (estrutura). Lima *et al.* (2010), avaliando a relação entre macrofauna edáfica e matéria orgânica, concluíram que os sistemas agroflorestais promoveram melhoria da fertilidade do solo e ocorrência de “engenheiros do ecossistema” (macroinvertebrados) em abundância. Isso ocorre porque o SAF favorece o restabelecimento desses organismos pelo manejo menos intensivo (Lima *et al.*, 2010). Silva *et al.* (2023) observaram um resultado semelhante ao avaliar visualmente a presença de macrofauna em um ambiente de pastagem e mata. Na área de vegetação nativa, identificou-se maior quantidade de macrofauna (escore 10) em relação à pastagem (escore 4). Esse mesmo padrão foi observado pelos autores em relação à matéria orgânica, ainda avaliando mata e pastagem. Raucci (2021), ao comparar atributos estruturais e macrofauna edáfica, concluiu que o SAF recriou condições naturais dos ambientes, favorecendo a macrofauna edáfica, o que não ocorreu na área de pastagem. Neste estudo, a área de pastagem degradada apresentou menores notas porque, além do tráfego animal, não são adotadas medidas conservacionistas de manejo do solo que favoreçam aporte de matéria orgânica.

A atividade microbiana está diretamente relacionada à presença de macrofauna, pois esta altera a população, diversidade e atividade microbiana, além de formar matéria orgânica (Bray *et al.*, 2019). O teste de campo para atividade microbiológica apresentou maiores notas para o sistema agroflorestal, em seguida da área de mata e pastagem (Figura 20).

**Figura 20.** Avaliação da atividade microbiana por meio de peróxido de hidrogênio

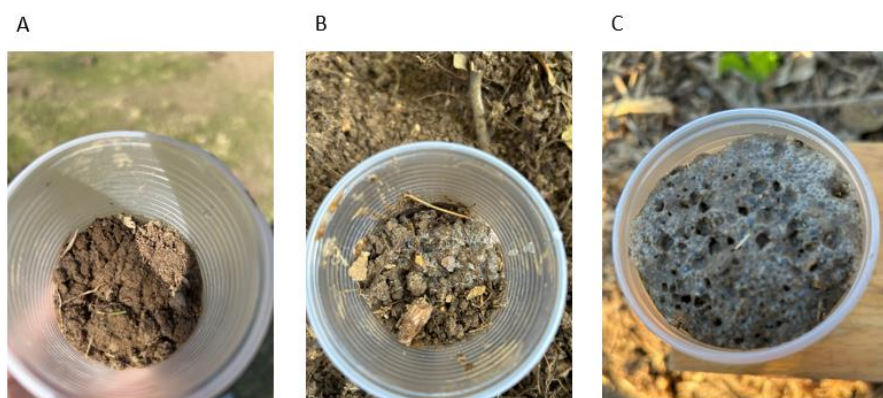


Foto: Autora (2025)

Legenda: (0) Condição pobre: Pouca ou nenhuma efervescência; Condição intermediária: (1) Efervescência leve; (2) Condição ótima: Efervescência significativa, com formação de várias bolhas.

Na área de pastagem, foi observada menor efervescência, isto é, pouca ou nenhuma formação de bolhas (Figura 20). Na mata e SAF, o comportamento foi diferente, com maior efervescência nesses dois sistemas. Conforme já mencionado, a mata é o sistema de referência por apresentar menor perturbação antrópica. No entanto, os resultados para atividade microbiana demonstraram que, no sistema agroflorestal, as notas atribuídas foram maiores que no ambiente de mata nativa. Ou seja, visualmente, houve maior efervescência das amostras de solo de SAF, com formação de várias bolhas. Enquanto isso, na área de vegetação nativa a efervescência foi menos intensa. Isso pode ser explicado porque, conforme análise química do solo (Tabela 1), a camada mais superficial apresentou maior teor de matéria orgânica na área de SAF do que na área de mata.

A maior efervescência do SAF pode ser explicada pela diferença tanto na velocidade do aporte de resíduos quanto na granulometria dos solos. Na mata, existe maior quantidade de areia na parte mais superficial, enquanto no SAF há mais argila (Tabela 2). Conforme Angst *et al.* (2021), essa diferença de textura afeta a decomposição da serapilheira e a retenção do carbono. Quando há mais partículas de argila, a microbiota do solo é mais eficiente em utilizar o material da serapilheira (Angst *et al.*, 2021), o que pode ter contribuído para a maior efervescência observada. No SAF, além dos resíduos vegetais e animais disponíveis na própria propriedade, o produtor utiliza materiais externos (como maravalha proveniente de podas de árvores) e os incrementa a cada novo ciclo das hortaliças – ou seja, essa prática pode propiciar maior aporte de MOS em uma velocidade maior. A partir disto e no conhecimento do manejo atualmente empregado, notou-se que, entre os sistemas, a área de pastagem necessita de maior atenção em curto prazo.

A saúde biológica do solo desempenha papel crucial na resiliência das pastagens, e a conservação da diversidade da microbiota do solo aumenta sua capacidade de se regenerar frente a impactos ambientais e manejo intensivo (Ferreira *et al.*, 2020). Conforme Hatfield, Sauer e Cruse (2017) e Mendes *et al.* (2021), a recuperação da atividade biológica é o primeiro passo no processo de regeneração de um solo. Com o tempo, o incremento da atividade biológica pode promover o aumento da matéria orgânica do solo (MOS), influenciando de forma positiva sua

qualidade química — como maior capacidade de retenção de nutrientes — e física — como melhor estrutura, favorecendo o armazenamento e a infiltração de água

Outro parâmetro relacionado às funções biológicas foi a avaliação de plantas espontâneas, demonstrada na Figura 21.

**Figura 21.** Avaliação de plantas espontâneas

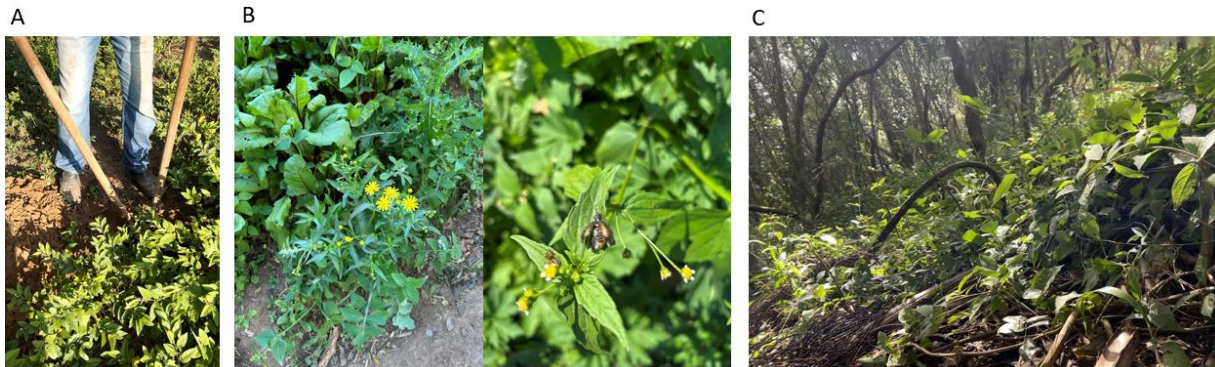


Foto: Autora (2025)

Legenda: **A.** (0) Condição pobre: Não há plantas espontâneas ou há predomínio de poucas espécies; **B.** (1) Condição intermediária: Há plantas espontâneas, com variedade intermediária de espécies; **C.** (2) Condição ótima: Há plantas espontâneas em quantidade e boa variedade de espécies.

Na área de pastagem, havia predominância de poucas espécies de plantas espontâneas. No SAF, a variedade foi intermediária, enquanto na mata havia abundância de plantas espontâneas no sub-bosque. Vale salientar que, embora o produtor realize manejo das plantas espontâneas no SAF, ainda são encontradas várias espécies, que servem, inclusive, para abrigo de invertebrados. Na mata, ambiente com menor perturbação antrópica, o solo estava praticamente todo coberto por esse tipo de planta, com a maior diversidade de espécies. A presença e diversidade de espontâneas possui relação com a fertilidade química do solo, além de funções biológicas e físicas (Primavesi, 2011; Visconti *et al.*, 2022).

Neste estudo, alguns indicadores visuais não demonstraram sensibilidade em relação às diferentes pressões de uso do solo, os quais foram pedregosidade e profundidade. Conforme Tabela 3, não houve diferença entre as notas atribuídas, o que se explica pelo fato de as áreas estarem sob Latossolo amarelo, uma classe pedológica que não apresenta pedregosidade e um dos seus atributos diagnósticos é ser profundo conforme Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) (Santos *et al.*, 2025a). Embora nesta pesquisa, estes indicadores não tenham demonstrado sensibilidade significativa, ainda assim, recomenda-se que os resultados obtidos e

apresentados no Guia Prático poderão ser utilizados por produtores em outros tipos de solo, com presença de pedregosidade e pouca profundidade (parâmetros limitantes para estabelecimento de culturas agrícolas).

Os resultados de resistência do solo à penetração (RP), índice de cone (IC), assim como os índices estruturais e de flocculação corroboraram com observações visuais realizadas a campo, as quais, na pastagem, evidenciam elevada resistência ao corte com faca e maior dificuldade de penetração de arame, além de escoamento superficial da água, carreamento de partículas e padrão horizontalizado do crescimento radicular.

#### **4.3 Apresentação do guia “Diagnóstico Visual da Qualidade do Solo: Um Guia Prático ao Agricultor Familiar”**

O guia “Diagnóstico Visual da Qualidade do Solo: Um Guia Prático ao Agricultor Familiar” foi elaborado a partir dos resultados obtidos e está disposto do Apêndice 1 desta dissertação.

## 5 CONCLUSÕES

Os indicadores de qualidade do solo nos três ambientes estudados — mata nativa, sistema agroflorestal agroecológico (SAF) e pastagem — demonstraram sensibilidade às diferentes pressões de uso e manejo do solo. A integração dessas abordagens confirmou a aplicabilidade dos métodos visuais na realidade da agricultura familiar.

O conjunto de indicadores visuais selecionado, baseado em metodologias consolidadas e adaptado às condições de campo, mostrou ser sensível e distinguiu adequadamente os ambientes. Os indicadores visuais demonstraram alta capacidade de identificar variações estruturais e funcionais relevantes ao diagnóstico em campo, configurando-se como ferramenta eficaz, rápida e de baixo custo para o monitoramento da qualidade do solo. O guia ilustrado produzido a partir da pesquisa torna essas informações acessíveis a esse público, favorecendo a adoção de práticas conservacionistas em manejar o solo. As evidências obtidas destacam a necessidade de ferramentas simples, participativas e ajustadas à realidade dos produtores em promover a conservação do solo através da extensão rural.

## 6 REFERÊNCIAS

A LIGHTER TOUCH. **Understanding Your Soil**: how to carry out a visual soil assessment. 2023. Disponível em: <https://a-lighter-touch.co.nz/wp-content/uploads/2023/04/VSA-guide-v2.pdf>. Acesso em: 25 set. 2025.

ABBASLOU, H.; HADIFARD, H.; GHANIZADEH, A. R. Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils. **Heliyon**, v. 6, n. 2, e03462, 2020.

ALEXANDRE, C.; SILVA, J. R. M.; FERREIRA, A. G. Comparação de dois métodos de determinação da textura do solo: sedimentometria por raio X vs. método da pipeta. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 24, n. 3, p.73-81, jul. 2001.

AL-KAISI, M.; KWAH-MENSAH, D. **Iowa Soil Health Management Manual**. Iowa: Iowa State University Extension and Outreach, 2017, 48p.

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Juíz de Fora: UFJF, 2005. 145 p.

ALMEIDA, B. G. *et al.* Porosidade. In: TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 82-93.

ALVARES, C. A *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE). **Soil cone penetrometer**. Saint Joseph, 2000. 833 p.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, nov. 2004.

ANGST, G. *et al.* Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 159, p. 108302, ago. 2021.

ANTÔNIO, A. C. **Propriedades de solo II – Textura, cor e porosidade**. Disponível em: [https://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/586/Aula\\_03.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/586/Aula_03.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em: 03 jul. 2025.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, 18 set. 2007.

ARAÚJO, E. A. *et al.* Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 187–206, 30 abr. 2012.

ARRUDA, L. E. V *et al.* Uso de metodologia participativa na obtenção de indicadores da qualidade do solo em Mossoró - RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 7, n. 5, p. 25-35, dez. 2012.

AMORIM, H. C. S. *et al.* Soil quality indices following long-term conservation pasture management practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 301, p. 107060, 2020.

ANDRADE, A. G.; TAVARES, S. R. L; COUTINHO, H. L. C. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.24, n.220, p.55-63, maio-ago, 2003.

ASSOULINE, S. Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. **Water Resources Research**, v. 49, n. 4, p. 1755–1772, abr. 2013.

BALL B.C; DOUGLAS, J. T. A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. **Soil Use and Management**, v. 19, n. 1, p. 50–56, 1 mar. 2003.

BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural. Quality: a development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, p. 329–337, 2007.

BARMAN, S. *et al.* Soil organic carbon stabilization inside microaggregates within macroaggregates is the major mechanism of carbon sequestration under a long-term agroforestry system in the foot hills of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, v. 253, p. 106649, nov. 2025.

BARTHES, B.; ROOSE, E. **Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels.** *Catena*, v. 47, n. 2, p. 133–149, 2002.

BARRETO, A. B. *et al.* Argila dispersa em água e grau de floculação de um Latossolo sob gramíneas no Brejo da Paraíba (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.7, n.3, p. 10-19, 2019.

BASSOI, L. H.; SOARES, J. Relação Solo-Água-Planta. In: ROCHA, E. M. M.; DRUMOND, M. A. (Org.). Fruticultura irrigada: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/896999/1/RelacaoSoloAguaPlanta.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.

BERGAMIN, A. C. *et al.* **Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho.** v. 34, p. 681–691, 2010.

BESTE, A. An applicable field method for the evaluation of some ecologically significant soil-function-parameters in science and agricultural consulting practice. In: Conferência da Organização Internacional de Conservação do Solo (International Soil Conservation Organisation (ISCO), 1999, West Lafayette - Indiana. **Anais [...]** West Lafayette: Institute for Soil Conservation and Sustainable Agriculture, 1999, p. 1 – 6.

BRAIDA, J.A *et al.* Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. **Tópicos em ciência do solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 7, p. 221-78, 2011.

BRAY, N. *et al.* Soil Macroinvertebrate Presence Alters Microbial Community Composition and Activity in the Rhizosphere. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, 22 fev. 2019.

BRITO, A. S. *et al.* Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1939–1948, 2011.

BROOKER, T. *et al.* Challenges of maintaining relevance to current agricultural issues in a long-term cropping establishment experiment in Canterbury, New Zealand. **Elsevier eBooks**, p. 71–87, 1 jan. 2020.

BOSSUYT, H.; SIX, J.; HENDRIX, P. F. Interactive effects of functionally different earthworm species on aggregation and incorporation and decomposition of newly added residue carbon. **Geoderma**, v. 130, n. 1-2, p. 14–25, jan. 2006.

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

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.

BURSTROM, H. G. Calcium and plant growth. **Biological Reviews**, v. 43, n. 3, p. 287–316, ago. 1968.

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 5, p. 853–863, 1 out. 2004.

CANTARELLA, H. *et al.* **Boletim 100**. Campinas: Fundag, 2022. 550 p.

CARLES, S. E. **Construção participativa de indicadores de qualidade do solo para avaliação da sustentabilidade de unidades olerícolas no Sul do Uruguai**. 2008. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Florianópolis.

Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

CARSEL, R. F.; PARRISH, R. S. Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics. **Water Resources Research**. v. 24, n. 5, p. 755-769. 1988.

CARVALHO, C. S. **Matéria orgânica, agregação e proteção física em solos tratados com lodo de esgoto**. 2015. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2015.

CARVALHO, D. A. *et al.* Conhecimento empírico de produtores rurais sobre biodiversidade e impactos ambientais nas vegetações ripárias em Diorama, estado de Goiás. **Ethnoscintia**, 31 dez. 2019.

CASALINHO, H.D. **Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas**. 2003. 192f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CASALINHO, H. D. *et al.* Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.13, n.2, p.195-203, 2007.

CASTRO, C. *et al.* **Magnésio: manejo para o equilíbrio nutricional da soja**. Londrina: Embrapa, 2020. 55 p.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos 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**, Viçosa, MG, v. 22, p. 527-538, 1998.

CAVALCANTE, L. F.; FERNANDEZ, B.; REICHARDT, K. Determinação de difusividade e condutividade hidráulica durante a infiltração horizontal. **Agropecuária Técnica**, v. 1, n. 1, p. 110–125, 9 dez. 2018.

CHAER, G. M. Métodos de integração de indicadores para avaliação da qualidade do solo. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 486 p.

CHERUBIN, M. R. *et al.* A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 1, p. 215, 2016.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 0, 13 fev. 2017.

COMIN, J. J. *et al.* **Guia prático de avaliação participativa da qualidade do solo em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH)**. Florianópolis: UFSC, 2024. 22 p. 3<sup>a</sup> ed.

CORINA, D. *et al.* **Maletín de para analizar suelos y de buenas prácticas agroecológicas**. 2. ed. Potosí: Prosuco, 2017. 82 p.

CORREA, J. *et al.* Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 21, p. 6019–6034, 1 nov. 2019.

CORREIA, J. R. **Pedologia e conhecimento local: proposta metodológica de interlocução entre saberes construídos por pedólogos e agricultores em área de cerrado em Rio Pardo de Minas, MG**. 2005. 251 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2005.

DELUZ, C. *et al.* Visual Soil Structure Quality Is Mostly Explained by Small-Size Structural Pores. **European Journal of Soil Science**, v. 76, n. 5, 1 set. 2025.

DIEZ, T.; WEIGELT, H.; BRANDHUBER, R. **Bodenstruktur erkennen und beurteilen: Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten**. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 7. Unveränderte Auflage, 2014. 56 p.

DORAN, J. W.; T.B. PARKIN. Defining and assessing soil quality. In: J.W. Doran *et al.* (ed.) Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Spec, Madison, 1994, p. 3–21.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (ed.). Methods for assessing soil quality. Madison: **Soil Science Society of America**, 1996. (SSSA Special Publication, 49). p. 25–37.

DORAN, J. W. *et al.* **Soil Quality Test Kit Guide**. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture – USDA, 1999.

DORNELLAS, D. C. *et al.* Atributos químicos e carbono orgânico do solo em cafezais e diferentes usos da terra na Região Mogiana De São Paulo. **Revista Eletrônica Multidisciplinar de Investigação Científica**, v. 4, n. 20, p. 227–242, 25 mar. 2025.

EMBRAPA. **PronaSolos – Programa Nacional de Solos**. Dashboards. Disponível em: <https://pronasolos.sgb.gov.br/dashboards/>. Acesso em: 03 dez. 2025.

EMMET-BOOTH, J. P. *et al.* A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 4, p. 623–634, 4 out. 2016.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. (2005). **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates.

ERKTAN, A. *et al.* Protists and collembolans alter microbial community composition, C dynamics and soil aggregation in simplified consumer–prey systems. **Biogeosciences**, v. 17, n. 20, p. 4961–4980, 17 out. 2020.

FAHMY, M. I. **The influence of clay particles on the hydraulic conductivity of sandy soils**. 1961. Tese (Doutorado em Agricultura) – Agricultural University of Wageningen, Wageningen, 1961.

FERNANDEZ, R. N.; SCHULZE, D. G. Munsell Colors of Soils Simulated by Mixtures of Goethite and Hematite with Kaolinite. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 155, n. 5, p. 473–478, 1 jan. 1992.

FERREIRA, C. A. **Avaliação comparativa do conhecimento local e técnico sobre a qualidade do solo em agroecossistemas do assentamento Oziel Alves III**. 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Português). R package version 1.2.2, 2021**. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>. Acesso em: 26 nov. 2025.

FERREIRA, E. P. *et al.* Soil microbial diversity and ecosystem functioning in degraded pastures. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 148, p. 107-115, 2020.

FERREIRA, H.; CASSIOLATO, M.; GONZALEZ, R. **Uma experiência de desenvolvimento metodológico para avaliação de programas: o modelo lógico do programa segundo tempo**. Texto para discussão 1369. Brasília: IPEA, 2009.

FONKENG, E. E. *et al.* Dynamics of soil organic carbon pools following conversion of savannah to cocoa agroforestry systems in the centre region of Cameroon. **Geoderma Regional**, v. 36, p. e00758–e00758, 10 jan. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Soil testing methods: global soil doctors programme - a farmer-to-farmer training programme**. Roma, 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Status of the World's Soil Resources: Main Report**. Roma: FAO, 2015. 650 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Programa Global de Doctores de los Suelos: Ejercicios de campo y fichas de evaluación.** Disponível em: [https:// www.fao.org/global-soil-partnership/soil-doctors-programme/material-educativo/ejercicios-de-campo/es/](https://www.fao.org/global-soil-partnership/soil-doctors-programme/material-educativo/ejercicios-de-campo/es/). Acesso em: 01 abr. 2025.

FRANCO, A. L. C. *et al.* Relating the visual soil structure status and the abundance of soil engineering invertebrates across land use change. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 49–52, nov. 2017.

FREITAS, R. C. A. **Argila dispersa em água determinada por agitação rápida, lenta e ultrassom.** 2011. 63 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FREITAS, D. A. F. *et al.* Qualidade do solo em sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 417-428, jul.–set. 2012.

FRIEDMAN, D. *et al.* **Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning.** Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2001. 48 p.

GARLAND, G. *et al.* Perspectives on the misconception of levitating soil aggregates. **Soil**, v. 10, n. 1, p. 23–31, 15 jan. 2024.

GERKE, J. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. **Soil Systems**, v. 6, n. 2, p. 33, 31 mar. 2022.

GHIMIRE, R. *et al.* Soil Health Assessment and Management Framework for Water-Limited Environments: Examples from the Great Plains of the USA. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 22, 2 mar. 2023.

GIAROLA, N. F. B. *et al.* Método de avaliação visual da qualidade da estrutura aplicado a Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, v. 39, n. 8, p. 2531–2534, 1 nov. 2009.

GOMES, P. J. P. **A evolução do conceito de qualidade: dos bens manufacturados aos serviços de informação.** Cadernos Bad 2, 2004. 18 p.

GRANDI, R. A. P.; SILVA, A. R. Fungos anamorfos decompositores do folhede de *Caesalpinia echinata* Lam. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 287-295, 2006.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. **Degradação dos solos no Brasil.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014. 22 p.

HAGEMANN, N.; HARTER, J.; BEHRENS, S. Elucidating the Impacts of Biochar Applications on Nitrogen Cycling Microbial Communities. **Biochar Application**, p. 163–198, 2016.

HARRELL, F. E. Jr.; DUPONT, C. **Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 5.2-3.** Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>. Acesso em: 26 nov. 2025.

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; CRUSE, R. M. Soil: the forgotten piece of the water, food, energy nexus. **Advances in Agronomy**, v. 143, p. 1-46, 2017.

HERNANI, L. C. **Agregação do Solo.** 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/sistema-plantio-direto/fundamentos/beneficios/ao-solo/fisica-do-solo/agregacao-do-solo>. Acesso em: 21 out. 2025.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS – IAC. **Métodos de análise física de solos do Instituto Agronômico (IAC): Boletim técnico — análise granulométrica**, v. 12, maio de 2021. Campinas: IAC, 2021.

IORI, P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SILVA, R. B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, supl. 1, p. 185-195, 2012.

JUNQUEIRA, P. H. Metodologias Alternativas para Avaliação da Estrutura do Solo em Sistemas Agropecuários de Produção. 2019. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana, 2019.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. **A Framework for Evaluating Physical and Chemical Indicators of Soil Quality**. Minneapolis: Wiley Online Library, 1994. 244 p.

KASPAR, T. C.; SINGER, J. W. **The Use of Cover Crops to Manage Soil**. In: HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J. (eds.). Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 2011. p. 321-337.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Eds.). Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Part 1. Madison: **American Society of Agronomy**, p.499-510.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregates stability and size distribution. In A. KLUTE (Ed). A Method of Soil Analysis, 1: Physical and Mineralogical Methods. Agronomy, n. 9, 2<sup>a</sup> ed. Madison, Wi., **American Society of Agronomy e Soil Science Society of America**, 1986, p. 425-441.

LAISHRAM, J. *et al.* Soil Quality and Soil Health: A Review. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, New Delhi, p. 19-37, out. 2015.

LARSEN, S. (1967). Soil Phosphorus. **Advances in Agronomy**, New York, v. 19, p. 151-210, 1967.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society American, 1994. p.37-52.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60–68, 1 dez. 2015.

LEPSCH, I. F.; MACHADO, N.; ESPIRONELO, A. Relação entre matéria orgânica e textura de solos sob cultivo de algodão e cana-de-açúcar, no estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 41, n. 1, p. 231–236, 1 jan. 1982.

LEPSCH, I. F. *et al.* **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa, MG: SBCS, 2015. 170 p.

LIBRARY ASSOCIATION. **Information quality and liability**. London: Library Association, 1994.

LIMA, G. C. *et al.* Spatialization of soil quality index in the Sub-Basin of Posses, Extrema, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 78–84, jan. 2016.

LIMA, S. S. *et al.* Relação entre macrofauna edáfica e atributos químicos do solo em diferentes agroecossistemas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, p. 322–331, mar. 2010.

LOSS, A. *et al.* Distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, p. 523–528, 1 set. 2009.

LUZ, F. B. **Indicadores da qualidade do solo em função do uso da terra**. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2017.

MACEDO, S. R. *et al.* Assessment of Soil Quality of Smallholder Agroecosystems in the Semiarid Region of Northeastern Brazil. **Land**, v. 13, n. 3, p. 304, 29 fev. 2024.

MADARI, B. E. **Fracionamento de agregados: procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo**. Rio de Janeiro: Embrapa

Solos, Comunicado Técnico 22, dez. 2004.

MARQUES, E. A. **Uso e adaptação de métodos de avaliação da qualidade do solo no campo como ferramenta de extensão rural**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2014.

MARTINS, I.; GOUVEA, G.; PICCININI, C. Aprendendo com imagens. **Ciência e Cultura**, Campinas, v. 57, n. 4, 2005, p. 38-40.

MAUSEL, P. W. Soil quality in Illinois - an example of a soils geography resource analysis. **The Professional Geographer**, Illinois, v. 23, n. 2, p. 127–136, 1971.

MCDANIEL, M. A.; PRESSLEY, M. (Eds.). **Imagery and Related Mnemonic Processes**. Nova York: Springer New York, 1987.

MEDINA, C.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; CORTÉS, C. A. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 91–101, 1 fev. 2012.

MELLONI, R. **Densidade e diversidade de bactérias diazotróficas e fungos micorrízicos arbusculares em solos de mineração de bauxita**. 2001, 173 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Lavras-MG, Universidade Federal de Lavras.

MELLONI, R. *et al.* Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2461-2470, 2008.

MELO, D. M. A. *et al.* Soil Quality Indicators in Peasant Agroecosystems in Paraíba State, Brazil. **Tropical Conservation Science**, v. 17, jan. 2024.

MENDES, I. C. *et al.* **Tecnologia BioAS: Uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. Planaltina: Embrapa Cerrados. Documento 369. 50 p. 2021.

MERCANTE, F. M. *et al.* Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 34, p. 479-485, 2008.

METER GROUP. **Mini Disk Infiltrometer Manual**. Pullman, WA, 2021.

MOEBIUS-CLUNE, B. N. *et al.* Comprehensive Assessment of Soil Health: The Cornell Framework. Cornell: Universidade de Cornell, 2016, 134p.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006, 744 p.

MUELLER, L. *et al.* Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 178–187, abr. 2009.

MUINDI, M. E. Understanding Soil Phosphorus. **International Journal of Plant & Soil Science**, vol. 31, no. 2, 25 dez. 2019, p. 1–18.

NABINGER, C. *et al.* **Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa**. In: Pillar, V. de P.; Müller, S. C.; Castilhos, Z. M.; Jaques, A. V. A. (eds.). Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. cap. 13, p. 175–198.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE – NRCS. **Rangeland Soil Quality - Aggregate Stability**. U.S. Department of Agriculture, 2022. Disponível em: [https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-12/Rangeland\\_Soil\\_Quality\\_Aggregate\\_Stability\\_0.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-12/Rangeland_Soil_Quality_Aggregate_Stability_0.pdf). Acesso em: 21 out. 2025.

NICHOLLS, C. I. *et al.* A rapid farmer-friendly agroecological method to estimate soil quality and crop health in vineyard systems. **Biodynamics**, Pottstow, v. 250, p. 33-40, 2004.

NIERO, L. A. C. *et al.* Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua

validação por análises físicas e químicas em um latossolo vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 4, p. 1271-1282, ago. 2010.

OLIVEIRA, P. *et al.* Determinação do carbono orgânico total em diferentes solos do Mato Grosso do Sul. **Editora Científica Digital eBooks**, p. 258–261, 1 jan. 2020.

OLIVEIRA, V. S. *et al.* Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 907–913, 1 set. 2010.

Organização das Nações Unidas (ONU). **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2>. Acesso em: 26 set. 2023.

OTTO, R. *et al.* High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil & Tillage Research**, v. 117, p. 201-210, 2011.

PARJEV, M. R. *et al.* **Soil Organic Carbon: A Foundational Indicator of Soil Health**. University of Missouri, 2025. M. U. Extension. Disponível em: <https://extension.missouri.edu/publications/g9071>. Acesso em: 18/09/2025.

PAVANELLI, L. E.; ARAÚJO, F. F. Parâmetros químicos e biológicos indicadores de qualidade de solo sob cultivo de braquiárias e soja no oeste paulista. **Revista Ceres**, v. 57, n. 1, p. 118–124, fev. 2010.

PEERLKAMP, P. K. A visual method of soil structure evaluation. **Landbouwhogeschool en Opzoekingsstations van de Staat te Gent**. n. 24, p.216-221, 1959.

PERI, P. L. *et al.* Soil organic carbon stocks in native forest of Argentina: a useful surrogate for mitigation and conservation planning under climate variability. **Ecological Processes**, v. 13, n. 1, 5 jan. 2024.

PENNING, L. H. *et al.* **Avaliação Visual para o Monitoramento da Qualidade Estrutural do Solo: VESS e VSA.** Pelotas: Embrapa, 2015. 41 p.

PINTO, G. K. M. *et al.* Educação em solos no ensino superior: técnicas de identificação de cor, horizontes e/ou camadas. **Observatório De La Economía Latinoamericana.** v. 23, n. 9, p. e11481, 2025.

PRIMAVESI, A. M. Agroecologia e manejo do solo. **Agriculturas,** Rio de Janeiro, v. 5, n. 3, p. 7-10, set. 2008.

PRIMAVESI, A. M. **Cartilha do solo: como reconhecer - e sanar seus problemas.** São Paulo: 2009. 72 p.

PRIMAVESI, A. **Agricultura sustentável: manual do produtor rural.** São Paulo: Nobel, 2011.

R CORE TEAM (2023). **\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

RALISCH, R. *et al.* **Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo – DRES.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Soja). Londrina: Documento 390. 65p. 2017.

RAMOS, M. R. *et al.* Soil, water and nutrient loss under conventional and organic vegetable production managed in small farms versus forest system. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics,** Kassel, v. 115, n. 1, p. 131–40, 2014.

RAUCCI, M. **Atributos físicos do solo e macrofauna edáfica em sistema agroflorestal e pastagem.** 2021. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2021.

REINERT, D. J. **Recuperação de solos em sistemas agropastoris**. In: DIAS, L.E.; GRIFFIT, J.J. (Eds.). *Recuperação de áreas degradadas*. Viçosa: UFV, 1998. p. 163-176.

REIS JUNIOR, F.B.; MENDES, I.C. **Biomassa microbiana do solo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Cerrados. Documento 205. 38p. 2007.

RESCK, D.V.S. *et al.* Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: **SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Editores). Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. revisada e atualizada – Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654p.

RESENDE, M. *et al.* **Pedologia: base para distinção de ambientes**. NEPUT, Viçosa, 2002. 339p.

ROCHA, J. A. M. R. *et al.* Catalisadores em ação: a decomposição do peróxido de hidrogênio. **Revista de Ensino de Bioquímica**, v. 22, n. 2, p. 108–118, 31 dez. 2024.

ROBERTSON, G.P.; GROFFMAN, P.M.; Nitrogen transformation. In: Paul, E.A. (Ed.), *Soil Microbiology, Biochemistry and Ecology*. Springer, New York, New York, 2007, p. 341–364.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa, 2010, 26 p. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas.

ROSOLEM, C.A. *et al.* Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 5, p.821-828, maio 1999.

ROTH, C. W. **Qualidade e produtividade**. Santa Maria: UFSM, 2011. 74 p.

SANTOS, H. C. *et al.* Kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1301-1310, 2011.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025a. 393 p.

SANTOS, I. B. *et al.* Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular da *Crotalaria juncea* L. **Diversitas Journal**, v. 10, n. 2, 7 jun. 2025b.

SANTOS, M. A. *et al.* Condutividade hidráulica do solo não saturado em diferentes sistemas de preparo de solo. **Revista de Biotecnologia & Ciência**, Ipameri, v. 14, e16298, p. 1–15, 2025c.

SANTOS, O. B. *et al.* Análise da vida microbiana do Solo na Comunidade de Ribeirão Alcobaca-BA. **In: Congresso Brasileiro de Agroecologia**, 11., 2020, São Cristóvão. Cadernos de Agroecologia. São Cristóvão: Cadernos de Agroecologia, 2020. v. 15, p. 1-6.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. **Plants**, vol. 10, n. 2, 23 fev. 2021, p. 419.

SCHIEBELBEIN, B. E.; SOUZA, V. S.; CHERUBIN, M. R. Soil health and management assessment kit (SOHMA KIT®): Development and validation for on-farm applications. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 27, p. 100802, 16 jul. 2025.

SCHALLER FW; STOCKINGER KR (1953) A Comparison of Five Methods for Expressing Aggregation Data. **Soil Science Society of America Journal**, 17: 310-313.

SETZER, J. **Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo**. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, 1966. 61p.

SHEPHERD, T. G. Visual soil assessment: Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. Palmerston North, **Horizons.mw & Landcare Research**, 2000. v.1. 84p.

SHEPHERD, T. G.; JANSSEN, H.; BIRD, L. **Visual soil assessment: soil management guidelines: hill country land uses**. Palmerston North: Horizons and Landcare Research, 2000. 4 v.

SHEPHERD, T. G. **Visual soil assessment: Field guide for pastoral grazing and cropping on flat to rolling country**. Palmerston North, **Horizons.mw & Landcare Research**, 2009, 2<sup>a</sup> ed, v. 1, 118p.

SILVA, P. L. F.; CAVALCANTE, A. C. P.; SILVA, A. G. Avaliação da degradação dos recursos ambientais: um estudo de caso no município de Pilõesinhos - PB. **Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 132-140, jan. 2016.

SILVA, S. M. A. *et al.* Resistência mecânica do solo à penetração associada à umidade, densidade, granulometria e macronutrientes em JI-Paraná-RO. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 5629–5647, 1 jan. 2021.

SILVA, R. B. *et al.* A soil quality physical–chemical approach 30 years after land-use change from forest to banana plantation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 7, 7 jun. 2022.

SILVA, T. L. *et al.* Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores visuais no Projeto de Assentamento Marcelo Déda. **Diversitas Journal**, v. 8, n. 4, p. 2832–2842, 2023.

SILVA, J. M. *et al.* Mineralização de vermicompostos estimada pela respiração microbiana. **Revista Verde**, Pombal, PB, v. 8, n. 4, p. 132-135, 2013.

SILVA, C. A. *et al.* Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In: BETTIOL, W. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2023. Cap. 1. p. 17-47.

so, C. P. *et al.* Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, n. 1, p. 1-21, fev. 2022.

SOBRINHO, T. A. *et al.* Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e

convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 191–196, ago. 2003.

SOLIGO, V. Indicadores: conceito e complexidade do mensurar em estudos de fenômenos sociais. **Estudos em Avaliação Educacional**, São Paulo, v. 23, n. 52, p. 12-25, maio 2012.

SOUZA, K. R. *et al.* Proposta da Metodologia RAQS para avaliação visual da qualidade do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 1815, 29 nov. 2016.

SOUZA, L. D.; SOUZA, L. S.; XAVIER, F. A. S. Aptidão agrícola do solo. In: BORGES, L. A. **Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. Cruz das Almas: Embrapa, 2021. Cap. 2. p. 27-49.

SPOHN, M.; KUZUYAKOV, Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 61, p. 69–75, jun. 2013.

SUÁREZ, J. C.; SEGURA, M.; ANDRADE, H. J. Agroforestry systems affect soil organic carbon stocks and fractions in deforested landscapes of Amazonia. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 5, p. 1139–1151, 16 fev. 2024.

TAIYUN, W.; VILIAM, S. **R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92)**. 2021. Disponível em: <https://github.com/taiyun/corrplot>. Acesso em: 26 nov. 2025.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017. 15 p.

TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C. **A cor do solo: Interpretando as cores do solo com a finalidade de monitorar processos de recuperação em áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. 4 p.

TOLEDO, V. M.; BARRERA-BASSOLS, N. **A Memória Biocultural**. A importância ecológica das sabedorias tradicionais. Tradução de Rosa Peralta. São Paulo: Expressão Popular, 2015.

USDA NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. **Soil Quality Indicators: biological indicators and soil functions**. Biological Indicators and Soil Functions. 2015. Disponível em: [https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/biological\\_indicators\\_overview.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/biological_indicators_overview.pdf). Acesso em: 01 set. 2024.

VALARINI, P. J. *et al.* Qualidade do solo em sistemas de produção de hortaliças orgânico e convencional. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 4, p. 485-491, 2011.

VALLÉE, G. J. A.; MIRANDA, E. E.; DORASWAMY, G. **Testes agronômicos no meio real: um elemento de diagnóstico para a pesquisa e a extensão rural**. Petrolina, PE: EMBRAPA–CPATSA, 1986. 58 p. Documento 42.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern Applied Statistics with S**. 4. ed. New York: Springer, 2002. ISBN 0-387-95457-0.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 150 p.

VISCONTI, F. *et al.* Spontaneous Plants Improve the Inter-Row Soil Fertility in a Citrus Orchard but Nitrogen Lacks to Boost Organic Carbon. **Environments**, v. 9, n. 12, p. 151–151, 4 dez. 2022.

WICKHAM, H. *et al.* Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

ZANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 1024-1030, 1997.

ZANI, J. L.; KRUMMENAUER, A. A fotografia e a extensão rural – uma reflexão sobre

o cotidiano dos pequenos produtores de leite no sul do Brasil. **Extensio: Revista Eletrônica de Extensão**, Florianópolis, v. 18, n. 38, p. 60–67, 2021. DOI: 10.5007/1807-0221.2021.e72178.

## **APÊNDICE 1**

Guia Ilustrado “Diagnóstico Visual da Qualidade do Solo: Um Guia Prático ao Agricultor Familiar”.