

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
BACHARELADO EM GEOGRAFIA**

FERNANDO SARAIVA DE SOUZA GAMA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA MUDANÇA NO USO DA TERRA DE
FLORESTA PARA CULTURA TEMPORÁRIA NAS PROPRIEDADES DE
SOLOS DA REGIÃO CENTRO-OCIDENTAL DO PARANÁ**

**MARINGÁ
2025**

FERNANDO SARAIVA DE SOUZA GAMA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA MUDANÇA NO USO DA TERRA DE
FLORESTA PARA CULTURA TEMPORÁRIA NAS PROPRIEDADES DE
SOLOS DA REGIÃO CENTRO-OCIDENTAL DO PARANÁ**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como parte dos requisitos
necessários para aprovação no
componente curricular Trabalho de
Conclusão do Curso de Bacharel em
Geografia da Universidade Estadual de
Maringá.

Orientador: Prof^a. Dra. Francieli
Sant'ana Marcatto

MARINGÁ
2025

RESUMO

O avanço da agricultura no município de Campo Mourão – PR, marcado pela substituição de áreas de floresta nativa em lavouras temporárias, principalmente de soja, tem promovido alterações significativas nas propriedades físicas e hídricas dos solos, comprometendo sua qualidade estrutural e funcional. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo geral analisar os impactos da mudança de uso da terra de florestas para culturas temporárias (soja/milho) na qualidade física e hídrica de Latossolos derivados de basaltos no município de Campo Mourão–PR. Para isso, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, em área mantida com floresta nativa e em área cultivada com soja. A partir das amostras coletadas em campo, foram procedidas as análises físicas de granulometria, densidade do solo, porosidade (macro e microporosidade) e estabilidade de agregados; análise hídrica de condutividade hidráulica saturada; e análise química de carbono orgânico do solo. Os resultados evidenciaram que os solos sob cultivo de soja apresentaram aumento na densidade, redução da porosidade total, da macroporosidade e da condutividade hidráulica, quando comparados aos solos sob vegetação nativa, indicando maior suscetibilidade à compactação e erosão. Os agregados dos solos foram grandes em ambos os usos, mas apresentam indicativos de que a sua formação ocorre associado a processos mecânicos ligados ao tráfego de máquinas no solo cultivado. Os impactos identificados são potencializados pelo manejo agrícola intensivo, ausência de práticas conservacionistas adequadas e pelo tráfego de máquinas pesadas, que intensificam a degradação da estrutura do solo. Dessa forma, é fundamental a adoção de práticas de manejo sustentável, alinhadas às características físicas dos solos, para mitigar os efeitos da degradação e garantir a conservação dos recursos hídricos e da qualidade do solo.

Palavras-chave: Latossolo Vermelho. Compactação. Qualidade física. Condutividade hidráulica. Campo Mourão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo, no município de Campo Mourão...	13
Figura 2 - Classe de Solos, município de Campo Mourão	17
Figura 3 - Censo agropecuários de Campo Mourão Soja e Milho 1991	20
Figura 4 - Classes de uso da terra em relação aos hectares no município de Campo Mourão – PR.....	21
Figura 5 - Resultado total do Valor Adicionado Bruto (VAB) a Preços Básicos (R\$1.000) – Campo Mourão.....	22
Figura 6 - Localização do raio de coleta no município de Campo Mourão	27
Figura 7 - Trincheira aberta na área de cultivo de soja (20-35cm) para a coleta de amostras.....	28
Figura 8 - Modelo de permeâmetro com carga constante	31
Figura 9 - Permeâmetro utilizado para a determinação da condutividade hidráulica saturada	31
Figura 10 - Mesa de Tensão utilizada na determinação da macroporosidade e microporosidade.....	35
Figura 11 - Agitador com jogo de peneiras utilizados na determinação da estabilidade de agregados via seca	38
Figura 12 - Imagem ilustrativa dos recipientes utilizados para pesagem dos agregados separados em classes de tamanho	38
Figura 13 - Relação entre porosidade total (%) e densidade do solo (g.cm^3) nos usos com soja e floresta	43
Figura 14 - Distribuição da macroporosidade e microporosidade nos usos com soja e floresta	44
Figura 15 - Relação entre macroporosidade, microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica (K_{sat}) nos usos com soja e floresta	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados populacionais da cidade de Campo Mourão (1940-2010) ...	19
Tabela 2 - Classificação do Coeficiente de Variação (CV%).....	32
Tabela 3 - Teores de Areia, Silte, Argila e classificação textural do Latossolo nos usos com soja e floresta	40
Tabela 4 - Valores médios de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) nos usos com soja e floresta ..	41
Tabela 5 - Coeficiente de Variação (CV%) e da condutividade hidráulica saturada (Ksat) por uso do solo e profundidade.....	46
Tabela 6 - Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO) e teor de argila nos usos com soja e floresta.....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. IMPACTOS DO MANEJO AGRÍCOLA NA ESTRUTURA DO SOLO	8
2.1.1. Compactação do solo	8
2.1.1.1. Destruição dos agregados do solo e perda de estabilidade estrutural ..	11
2.1.1.2. Consequências ambientais da degradação dos solos	12
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	13
3.1. LOCALIZAÇÃO	13
3.2. ASPECTOS FÍSICOS.....	14
3.3. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS.....	18
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
4.1. TRABALHOS DE GABINETE.....	24
4.1.1. Levantamento bibliográfico.....	25
4.1.2. Definição da área de estudo.....	26
4.2. TRABALHO DE CAMPO	26
4.3. TRABALHO EM LABORATÓRIO	29
4.3.1 Análise Hídrica.....	29
4.3.2 Análises Físicas.....	33
4.3.2.1. Granulometria.....	33
4.3.2.2. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total	34
4.3.2.3. Densidade do Solo	36
4.3.2.4. Estabilidade de agregados via seca.....	37
4.3.3. Análise Química.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1. GRANULOMETRIA.....	40
5.2. DENSIDADE DO SOLO E POROSIDADE	41
5.3. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (Ksat).....	45
5.4. ESTABILIDADE DE AGREGADOS	48
5.5. QUALIDADE DO SOLO (QS) COMO INDICADOR DA SUA FUNÇÃO E ESTRUTURA	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

O avanço da agricultura no município de Campo Mourão - PR como em diversos outros municípios do Estado, foi marcado pela conversão gradual de áreas de floresta nativa em lavouras temporárias de soja e milho que promoveram alterações significativas nas propriedades físicas dos solos. Essa mudança no uso e cobertura do solo, muitas vezes sem o devido conhecimento das características naturais dos solos e sem a adoção de práticas de manejo conservacionistas, tem ocasionado à compactação do solo, redução da infiltração de água, perda da matéria orgânica e mudanças qualidade e tamanho dos agregados, comprometendo a qualidade física e a sustentabilidade a longo prazo dos solos (REICHERT et al., 2007; SILVA et al., 2000; DEXTER, 1988).

A região é predominantemente composta por Latossolos Vermelhos de textura muito argilosa derivados de basaltos, que, apesar de apresentarem boa capacidade de infiltração e retenção de água, podem se tornar suscetíveis à degradação quando manejados de forma inadequada (TORMENA et al., 1998; BEUTLER et al., 2001). A intensificação das práticas agrícolas, aliada à retirada ou ao manejo inadequado da cobertura vegetal, sem o controle do tráfego de máquinas, tem acelerado processos de compactação e erosão, o que compromete a estrutura física e a produtividade do solo (REICHERT et al., 2007).

Apesar dos avanços no conhecimento técnico e científico, e da implementação de programas voltados à conservação do solo, como o plantio direto e o uso de curvas de nível, muitas áreas da região ainda são conduzidas com práticas que ignoram as limitações e fragilidades naturais dos solos. Como resultado, especialmente da retirada da vegetação florestal, observam-se alterações expressivas no equilíbrio físico-hídrico do solo, afetando atributos como a porosidade, densidade, estabilidade de agregados e condutividade hidráulica — fatores determinantes para a infiltração de água, recarga hídrica e controle dos processos erosivos, conforme demonstrado por Reichert et al. (2007) e Beutler et al. (2003).

Nesse contexto, passa a ser essencial o monitoramento e a avaliação dos efeitos da mudança do uso do solo sobre as propriedades físicas, estruturais e hídricas dos solos da região, de modo que haja orientação estratégica que

concilie a produção agrícola com a conservação ambiental. Compreender como os atributos físicos do solo respondem às mudanças no uso da terra é essencial para promover uma gestão agrícola mais sustentável, especialmente em bacias hidrográficas que dependem da preservação da qualidade e da disponibilidade dos solos e da água (OLIVEIRA et al., 2013).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo principal analisar os impactos da mudança de uso da terra de florestas para culturas temporárias (soja/milho) na qualidade física e hídrica de Latossolos derivados de basaltos no município de Campo Mourão–PR. Para isso, foram propostos os seguintes objetivos específicos: estudar os atributos físicos dos solos ligados a compactação; determinar o volume de poros e a capacidade de infiltração de água no solo; avaliar a estabilidade dos agregados e o risco de erosão; verificar se a mudança de áreas de floresta para o cultivo de soja/milho alterou a qualidade físico-hídrica dos solos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. IMPACTOS DO MANEJO AGRÍCOLA NA ESTRUTURA DO SOLO

O manejo agrícola é essencial para a produção de alimentos, mas pode gerar impactos expressivos na estrutura, nas propriedades físicas e na qualidade hídrica dos solos. Entre os principais efeitos estão a compactação, a destruição dos agregados e a redução da capacidade de infiltração de água (ARAÚJO et al., 2004).

Segundo Dexter (2004), a qualidade física do solo está intimamente relacionada à sua estrutura e porosidade, fortemente influenciadas pelo teor de matéria orgânica e pelas práticas de manejo adotadas. Esses atributos influenciam diretamente a retenção de água, condição indispensável ao crescimento saudável das plantas cultivadas.

A adoção de práticas como a incorporação de resíduos vegetais e o uso de adubos orgânicos contribuem de forma significativa para melhorar a estrutura do solo. Estudos apontam que essas práticas elevam o teor de matéria orgânica, intensificam a atividade biológica e favorecem a formação de agregados mais estáveis, tornando a estrutura do solo mais resistente à degradação (AMBROSANO et al., 2023).

Destaca-se ainda que o uso de maquinários pesados e monoculturas, quando manejados de forma inadequada, pode agravar a compactação e reduzir a porosidade do solo. Por isso, recomenda-se a adoção de práticas mais sustentáveis para conservar a porosidade e a agregação, visando manter a qualidade física do solo (BRONICK; LAL, 2005).

2.1.1. Compactação do solo

A compactação do solo, frequentemente causada pelo tráfego intenso de máquinas agrícolas pesadas, exerce pressões elevadas sobre o perfil do solo, resultando em aumento da densidade, redução da porosidade total e da macroporosidade, além de alterar a continuidade dos poros. Esses efeitos comprometem a infiltração de água, a drenagem, o crescimento das raízes e a produtividade das culturas (ASSIS; LANÇAS, 2005; DEXTER, 2004).

De acordo com o estudo de Centurion et al. (2009), o tráfego intenso de tratores elevou a resistência do solo à penetração em áreas de Latossolo Vermelho, limitando significativamente o crescimento do milho e reduzindo a produtividade quando comparado a áreas menos compactadas. O aumento da resistência mecânica dificulta o desenvolvimento do sistema radicular, restringindo a absorção de água e nutrientes.

Além disso, a compactação gera descontinuidade dos poros, resultando na diminuição da condutividade hidráulica do solo. Como consequência, há maior dificuldade de infiltração de água, maior escoamento superficial e menor retenção de umidade disponível para as plantas, o que afeta diretamente o potencial produtivo das lavouras (ASSIS; LANÇAS, 2005; SILVA et al., 2006).

A dinâmica da água no solo é essencial para compreender a formação e a degradação do solo. A circulação da água no solo é fundamental para os processos pedogenéticos. Entretanto, fluxos hídricos concentrados podem promover a formação de feições erosivas, tornando-se fatores significativos na degradação do solo (MARQUES et al., 2008).

Estudos de Reichert et al. (2003) confirmam que sistemas agrícolas intensivos, quando comparados a áreas com vegetação nativa, apresentam redução significativa da porosidade e aumento da densidade aparente, condições que afetam negativamente a estrutura do solo e restringem a infiltração de água e o desenvolvimento radicular (REICHERT et al., 2003).

Esses resultados reforçam que o manejo inadequado do solo, aliado ao tráfego excessivo de máquinas em condições de alta umidade, potencializa a compactação e seus efeitos adversos, pois a redução da porosidade impacta diretamente a infiltração de água, podendo inclusive dificultar a germinação de sementes em condições severas (SILVA et al., 2006).

Um estudo realizado por Santos et al. (2021) identificou alterações significativas nas propriedades de um Latossolo Amarelo, na região do MATOPIBA, após a conversão de cerrado em áreas agrícolas com rotação de cultura de soja e algodão. Os resultados indicaram aumento significativo na densidade do solo e resistência à penetração, bem como redução da macroporosidade, que impactou nos resultados de condutividade hidráulica. Os autores avaliaram que a mudança de uso da terra afetou significativamente as

funções do solo de fluxo de água, difusão de ar, crescimento das plantas e resistência à degradação.

Práticas agrícolas como aração profunda e frequente também contribuem para agravar o problema, pois destroem a estrutura natural do solo, desestabilizando agregados e expondo a matéria orgânica à ação erosiva do vento e da água. Essa afirmação corrobora com Barajas et al. (2023), que mencionam que a aração profunda e o manejo intensivo do solo levam à perda de matéria orgânica e aumentam a vulnerabilidade do solo à erosão hídrica e eólica, potencializando a degradação estrutural. Isso resulta em menor coesão entre as partículas, maior perda de solo por escoamento superficial e menor capacidade de retenção de água (REICHERT et al., 2003).

O manejo inadequado do solo ainda interfere de forma significativa na qualidade hídrica, favorecendo a ocorrência de escoamento superficial carregado de sedimentos. A ausência de práticas de conservação, como a cobertura vegetal, amplia a vulnerabilidade do solo à erosão, aumenta o transporte de sedimentos para os corpos d'água e pode causar assoreamento, além de comprometer a qualidade da água (MACHADO, 2003).

Segundo Silva et al., (2006), o risco de compactação é ainda maior quando há aplicação de carga em solos úmidos, situação em que a capacidade de infiltração de água diminui drasticamente, aumentando o escoamento superficial e os riscos de erosão.

Por outro lado, a adoção de práticas conservacionistas, como o terraceamento, o plantio em nível e o controle do tráfego de máquinas, contribui para reduzir a compactação e aumentar a infiltração de água. Estudos realizados em Latossolos do Cerrado comprovaram que essas práticas conservam a água no solo, minimizam perdas por erosão e favorecem a recarga dos aquíferos, mantendo a disponibilidade hídrica para as culturas (RESCK, 2002).

Por fim, Reichert et al. (2003) destacam que o manejo sustentável e o monitoramento adequado da umidade e da densidade do solo são estratégias fundamentais para mitigar o risco de compactação, garantir a conservação da estrutura do solo e preservar a funcionalidade hídrica das áreas agrícolas, enfatizando que práticas conservacionistas e um manejo responsável contribuem para a manutenção do equilíbrio físico e hidrológico dos solos.

2.1.1.1. Destruição dos agregados do solo e perda de estabilidade estrutural

Uma das consequências do uso agrícola dos solos é a diminuição do tamanho dos agregados ou perda da estabilidade estrutural. Neste sentido, Borges et al. (2015) identificaram, no Cerrado de Uberlândia-MG, variações significativas no tamanho de agregados em áreas sob mata nativa e em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. A destruição dos agregados do solo foi intensificada pelo manejo inadequado, que incluíam operações como aração e gradagem excessivas, que expõem a matéria orgânica, comprometendo a estabilidade estrutural (BORGES et al., 2015).

De forma igual, Wendling et al. (2005), ao avaliarem um Latossolo Vermelho sob diferentes usos agrícolas em Capinópolis-MG, observaram que houve uma redução significativa da estabilidade dos agregados em sistemas de cultivo convencional, em comparação à floresta, que evidencia que o revolvimento intenso do solo reduz o teor de carbono orgânico, elemento fundamental para a formação de agregados que são mais estáveis.

Além disso, Marcatto et al. (2021), em estudo realizado em Astorga-PR, identificaram que, em uma topossequência cultivada com cana-de-açúcar sobre arenitos da Formação Santo Anastácio, ocorreu formação de agregados grandes no Latossolo, porém associados à compactação superficial, resultando em agregados de baixa estabilidade estrutural.

Práticas como a manutenção da cobertura vegetal e a aplicação de matéria orgânica são fundamentais para a formação e a estabilidade dos agregados. Sistemas de manejo como o plantio direto e a rotação de culturas contribuem para manter a atividade biológica do solo, fortalecendo os agregados (SILVA; MIELNICZUK, 1998; BEUTLER et al., 2001).

A ação das gotas de chuva em solos descobertos é outro fator que favorece a desagregação. Estudos de Thomaz et al. (2022) demonstram que a energia do impacto da chuva pode desintegrar agregados, formando crostas superficiais que dificultam a infiltração de água. Por isso, a cobertura vegetal é essencial para proteger a estrutura do solo.

Portanto, manter a estabilidade estrutural do solo é indispensável para reduzir o risco de erosão, pois solos bem agregados resistem melhor à ação da

chuva e ao escoamento superficial, conservando a camada fértil e mantendo sua capacidade produtiva (TISDALL; OADES, 1982).

2.1.1.2. Consequências ambientais da degradação dos solos

A degradação dos solos afeta tanto áreas de cultivo quanto remanescentes florestais. Em cultivos temporários, a compactação reduz a porosidade e a infiltração de água, enquanto práticas intensivas de preparo aumentam a suscetibilidade à erosão e à perda da camada superficial fértil do solo (DUTRA et al., 2007).

Além da compactação, a mudança no uso da terra promove a redução do teor de matéria orgânica do solo, impactando negativamente sua função como reservatório de carbono, fator essencial no sequestro de CO₂ atmosférico (SILVA; MIELNICZUK, 1998). A perda de matéria orgânica, associada à maior mobilização do solo, potencializa ainda mais os processos erosivos (SILVA; MIELNICZUK, 1998).

Esses processos contribuem para impactos fora dos limites da área de cultivo, uma vez que Blanco-Canqui e Wortmann (2020) alertam que a degradação interfere diretamente nos cursos d'água, intensificando o assoreamento e a eutrofização devido ao aumento do transporte de sedimentos e nutrientes. Os autores reforçam ainda que práticas de manejo inadequadas podem anular os serviços ecossistêmicos proporcionados por sistemas conservacionistas, ampliando os impactos negativos. Já em áreas de floresta, a remoção da vegetação nativa acarreta efeitos igualmente prejudiciais, como o aumento da vulnerabilidade à erosão e alterações no microclima local, o que interrompe o ciclo de nutrientes e empobrece o solo a longo prazo (PUIGDEFÁBREGAS, 2005; GYSSELS et al., 2005).

Diante desse cenário, torna-se essencial adotar estratégias de manejo conservacionistas, como os sistemas agroflorestais, que favorecem a ciclagem de nutrientes e a conservação do solo (DANIEL et al., 2023; BEUTLER et al., 2001; BERTOL et al., 2010), contribuindo para a manutenção da produtividade e a preservação dos serviços ecossistêmicos.

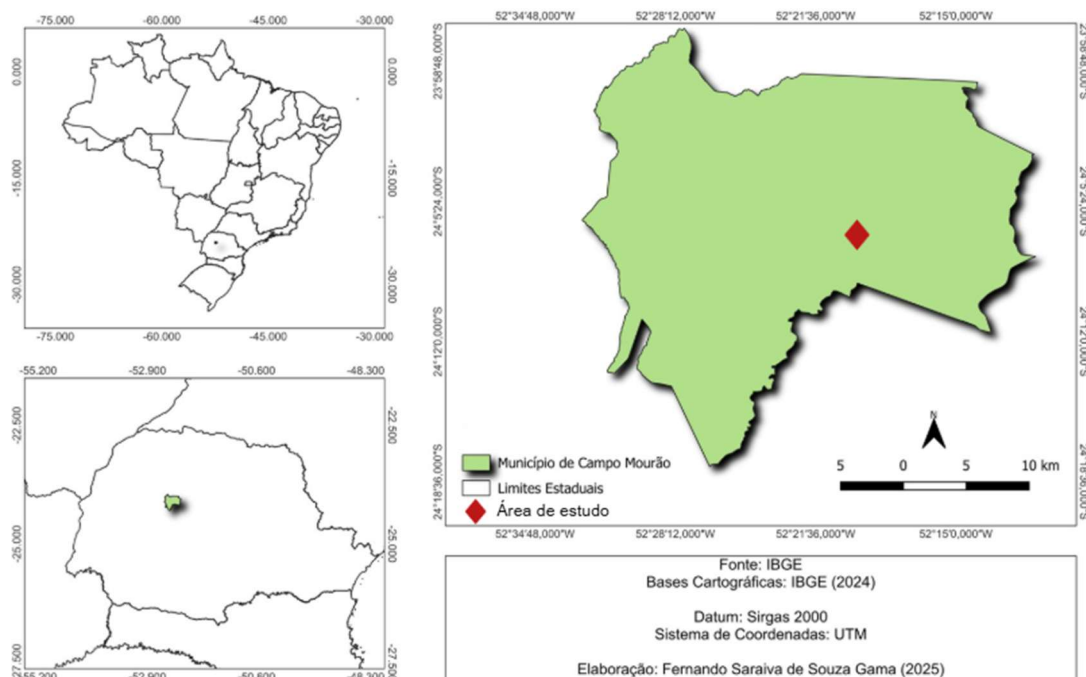
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO

O estudo foi realizado no município de Campo Mourão, localizado na mesorregião Centro-Ocidental do Paraná. A área de pesquisa está inserida no Terceiro Planalto Paranaense, especificamente na unidade geomorfológica do Planalto de Guarapuava (MINEROPAR, 2006). O município abrange uma extensão territorial de 757,114 km² (IBGE, 2022) e encontra-se no interflúvio da bacia hidrográfica do rio Ivaí, sendo cortado por diversos cursos d'água que compõem essa bacia. A altitude média da região é de aproximadamente 650 metros.

O estudo foi desenvolvido em área de floresta do Parque Estadual Lago Azul e na área rural circundante, uma região de relevante importância ecológica e hidrológica. A área analisada está localizada nas coordenadas geográficas 24°11'13.53" de latitude Sul e 52°18'31.55" de longitude Oeste, abrangendo setores de vegetação nativa preservada e áreas de uso agrícola adjacentes (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo, no município de Campo Mourão



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

3.2. ASPECTOS FÍSICOS

O regime pluviométrico é um fator climático determinante para a dinâmica dos solos, produtividade agrícola e processos erosivos. A distribuição das chuvas ao longo do ano exerce influência direta sobre o manejo das culturas e a conservação ambiental (ALVARES et al., 2013).

A partir do estudo da região de Campo Mourão, trabalhos como os de Alvares et al. (2013) e IAPAR (2019) indicam que a maior concentração de chuva ocorre entre os meses de outubro e março, abrangendo as estações da primavera e do verão. Nesse período, os valores pluviométricos médios históricos alcançam aproximadamente 400 a 500 mm na primavera e 600 mm no verão, sendo essa distribuição influenciada pela atuação de frentes frias e pela convergência de umidade oriunda da Amazônia. Por outro lado, o outono (abril a junho) e o inverno (julho a setembro) apresentam menores volumes de precipitação, com médias de 300 mm e 250 mm, respectivamente.

Ainda de acordo com Alvares et al. (2013) e IAPAR (2019), quanto à média histórica mensal, janeiro é destacado como o mês mais chuvoso, com cerca de 160 a 180 mm, enquanto agosto é caracterizado como o mais seco, registrando aproximadamente 40 a 60 mm de precipitação. Essa redução no volume de chuvas durante o inverno, especialmente em agosto, está associada à menor influência de sistemas frontais e à redução do transporte de umidade para a região. A média anual de precipitação situa-se entre 1600 e 1800 mm, isso indica um regime de precipitação bem distribuído ao longo do ano, mesmo apresentando variações sazonais.

Em relação às temperaturas da região de Campo Mourão, de acordo com IAPAR (2019), o período mais quente identificado é a estação do verão com temperaturas médias que variam entre 24,1° e 25°C, seguido pelas estações da primavera e outono com 21,1° a 22°C e pelo inverno, cujo as temperaturas médias variam de 17,1 a 18°C. Por fim, a temperatura média anual é de aproximadamente 21,5°C.

Em relação ao relevo, o município de Campo Mourão está predominantemente situado sobre formas de relevo suavemente onduladas, caracterizadas por morros de topo aplainado, vales em calha e vertentes com perfis retilíneos e côncavos na base, o que indica um grau relativamente baixo

de dissecação do terreno favorecendo assim o escoamento da água pluvial em direção aos fundos de vale, onde se concentram os cursos d'água. Essas feições geomorfológicas influenciam diretamente a dinâmica hídrica e o uso da terra, sobretudo na agricultura e expansão urbana (MINEROPAR, 2006).

No que diz respeito à geologia, o município de Campo Mourão está associado predominantemente aos basaltos do Grupo Serra Geral, mais especificamente à Formação Paranapanema, formada por extensos derrames de lava vulcânica que ocorreram durante o período Cretáceo da era mesozoica (BESSER et al., 2021). Ainda, segundo Besser et al. (2021), esses basaltos se originaram de erupções vulcânicas fissurais em ambientes de extensão tectônica, resultando em rochas ricas em ferro e magnésio que configuram a paisagem geológica predominante do município.

Os basaltos dessa formação podem ser maciços, com estrutura uniforme, ou amigdaloides. Além disso, essas rochas são afaníticas, o que significa que seus cristais são muito pequenos e só podem ser vistos com um microscópio. Sua cor varia de cinza a preto e, embora sejam predominantemente basaltos, pode-se encontrar algumas rochas andesíticas (mais ricas em sílica) de forma rara (KÄMPF, N.; CURI, N, 2012).

Além das rochas ígneas, ocorrem também arenitos do Grupo Caiuá, representado pela Formação Goio Erê, composta por arenitos subarcoseanos finos a muito finos, de coloração marrom-avermelhada a cinza arroxeada, com estratificação cruzada, camadas tabulares, e ondulações eólicas (BESSER et al., 2021). Esses arenitos aparecem principalmente em áreas de transição a oeste do município.

Em relação aos solos (Figura 2), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – EMBRAPA (2018) e com o Mapa de Solos do município de Campo Mourão do ano de 2011, identificam-se predominantemente as seguintes classes de solos: Latossolos, Nitossolos, Argissolos e Neossolos.

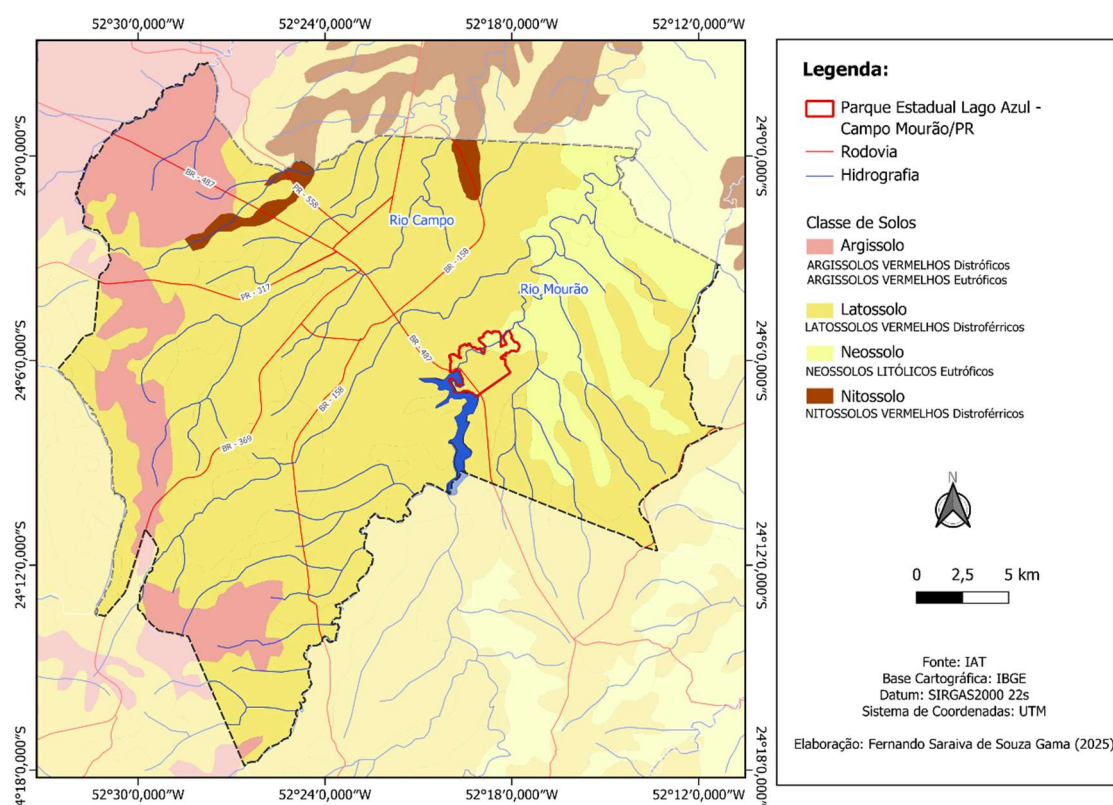
Os Latossolos são solos profundos, bem estruturados e intensamente intemperizados. Apresentam boa drenagem, acidez natural e textura predominantemente argilosa. São amplamente utilizados na agricultura, especialmente para o cultivo de soja e milho, devido à sua boa estrutura física e à possibilidade de correção da acidez e fertilidade com práticas adequadas de manejo (EMBRAPA, 2018).

Os Nitossolos são solos profundos, bem drenados e estruturados, com boa fertilidade e textura argilosa. São bastante utilizados para culturas anuais e perenes, como o cultivo do café, devido às suas boas propriedades físicas e químicas (EMBRAPA, 2018).

Os Argissolos possuem um horizonte B textural (Bt), marcado pelo acúmulo de argila na subsuperfície, o que lhes confere uma textura variando de média a argilosa. Embora possam apresentar fertilidade variável, sua elevada suscetibilidade à erosão exige práticas conservacionistas e manejo adequado, especialmente em áreas de relevo mais acidentado (EMBRAPA, 2018).

Os Neossolos são solos pouco desenvolvidos, com escassa evolução pedogenética, caracterizados pela presença do horizonte A, composto por material orgânico e inorgânico. Na área predominam os Neossolos Litólicos e Regolíticos, que apresentam baixa fertilidade natural, são geralmente rasos e pedregosos, além de possuírem baixa capacidade de retenção de água, o que os torna pouco adequados para o uso agrícola intensivo (EMBRAPA, 2018).

Na área de estudo, predominam os Latossolos Vermelhos de textura argilosa, profundos, de boa drenagem e estrutura favorável ao desenvolvimento de atividades agrícolas, principalmente o cultivo de grãos como a soja e o milho (EMBRAPA, 2018).

Figura 2 – Classe de Solos do município de Campo Mourão

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

De acordo com o mapa de distribuição das unidades fitogeográficas e das análises feitas por Roderjan et al (2002), o município de Campo Mourão apresenta uma diversidade significativa de formações vegetais nativas. Segundo Roderjan et al. (2002), o território é originalmente recoberto por três principais tipos de vegetação: a Floresta Estacional Semidecidual, predominante na região, caracterizada por espécies que perdem parte de suas folhas durante a estação seca; a Floresta Ombrófila Mista, com presença de *Araucaria angustifolia* e ocorrendo em áreas de maior altitude e umidade; e, em menor proporção, relictos de Cerrado, com vegetação típica de savana e alta diversidade florística. Essa variedade fitogeográfica é resultado das transições ecológicas e das condições climáticas e geológicas da região.

Na área de estudo, essas três formações também estão presentes, sendo a Floresta Estacional Semidecidual a mais representativa, seguida por trechos pontuais de Floresta Ombrófila Mista e alguns fragmentos de Cerrado, configurando um importante mosaico de vegetações nativas remanescentes na paisagem local.

3.3. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

O município de Campo Mourão foi marcado por uma sequência de eventos que refletiam as políticas de colonização e desenvolvimento regional implementadas na época. Inicialmente, a região era habitada por populações indígenas, cuja presença foi gradualmente suprimida com o avanço das frentes colonizadoras (MARTINS, 1953).

No início do século XX, o governo estadual adotou medidas para promover a ocupação da área, destinando terras públicas para a formação de núcleos urbanos. Em 1903, por exemplo, foram concedidos 2.000 hectares na Serra da Pitanga e igual área no distrito de Campo Mourão para a construção de futuras povoações (MARTINS, 1953).

De acordo com Cruz (2010), a década de 1940 foi crucial para a consolidação urbana de Campo Mourão. Em 6 de outubro de 1940, ocorreu a demarcação definitiva do primeiro lote urbano, marcando o início efetivo do povoamento tanto da área urbana quanto do interior do distrito. Nessa época, pioneiros como Leo Guimarães, Guilherme de Paula Xavier, Francisco de Albuquerque e Margarida Wakin estabeleceram as primeiras casas comerciais, impulsionando o desenvolvimento local (SIMIONATO, 1999). Logo depois, a malha urbana inicial seguiu um traçado ortogonal, adaptado ao relevo moderadamente ondulado da região, expandindo-se ao longo de um espigão que separa os rios do Campo e 119, os quais serviram como limitadores naturais para a expansão urbana inicial da cidade de Campo Mourão (MARCOTTI e MARCOTTI, 2011).

Ainda de acordo com Marcotti e Marcotti (2011), a evolução populacional de Campo Mourão (Tabela 1) ficou diretamente associada às políticas de colonização implementadas no Paraná a partir da década de 1940. Os autores, inicialmente, citam a ocupação do território e que ela foi impulsionada pela migração de famílias provenientes de outras regiões do Brasil, sobretudo as que viviam no interior de São Paulo, em busca de terras férteis para a agricultura. O crescimento demográfico ocorreu de forma acelerada entre as décadas de 1950 e 1980, quando a infraestrutura urbana passou por um processo de consolidação, incluindo a instalação de serviços públicos essenciais, como

escolas, hospitais e sistemas de abastecimento de água e energia elétrica (MARCOTTI e MARCOTTI, 2011).

Tabela 1 – Dados populacionais da cidade de Campo Mourão (1940-2010)

Anos	População Total	População Rural	População Urbana	Aumento em (%)
1940	11.964	-	-	-
1950	33.949	32.112	836	2,46%
1960	140.362	120.873	19.489	13,88%
1970	77.118	49.207	27.911	36,19%
1980	75.423	26.084	49.339	65,40%
1991	82.318	9.983	72.335	87,86%
2000	80.476	5.722	74.754	92,87%
2010	87.194	4.518	82.676	94,80%

Fonte: IBGE – Censo Demográfico cidade de Campo Mourão - PR (2025).

Em concordância com o autor anterior, Martins (1953) mostra que a diversificação econômica e a expansão do setor terciário contribuíram para a fixação da população urbana, reduzindo a dependência exclusiva da atividade agrícola e que o crescimento populacional também resultou em desafios sociais, como a necessidade de habitação, ampliação da oferta de serviços públicos e geração de empregos. O autor ainda salienta que o planejamento urbano passou a ser uma preocupação constante da administração municipal, visando equilibrar o desenvolvimento econômico com a qualidade de vida da população.

De acordo com Marcotti e Marcotti (2011), a partir da década de 1980, Campo Mourão teve um crescimento populacional urbano muito significativo, e que foi impulsionado pela modernização da agropecuária e pelo fortalecimento do setor de serviços. Dessa forma, a cidade se consolidou como um polo regional, atraindo migrantes de municípios vizinhos e de outras regiões do Paraná. Os autores ainda enfatizam que esse crescimento resultou na necessidade de ampliação da infraestrutura urbana, incluindo redes de abastecimento de água, saneamento básico e transporte público.

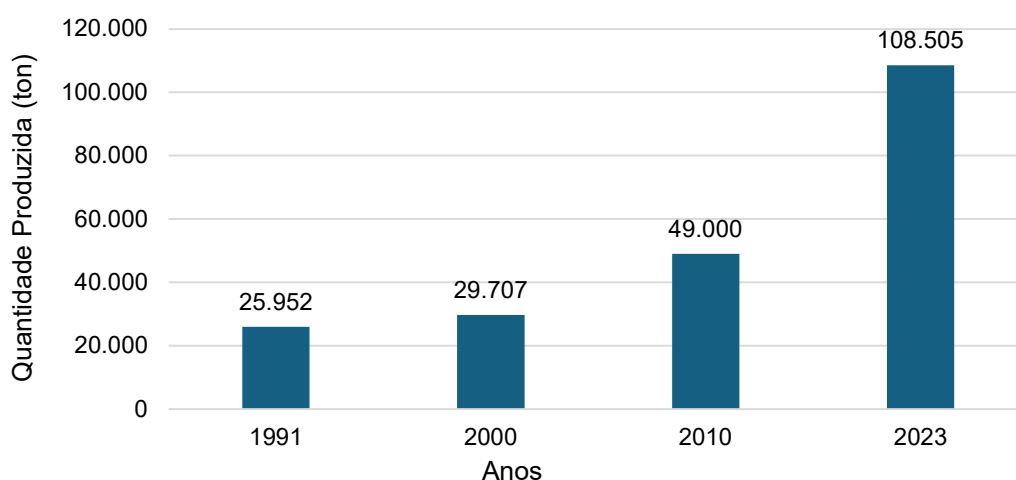
Segundo Yokoo (2009), alguns fatores impulsionaram o aumento da produção no município de Campo Mourão durante o século XX, entre os quais, menciona-se a mecanização agrícola, o avanço das tecnologias de produção e o aumento da demanda por grãos, especialmente soja e milho. A agricultura sempre foi um setor essencial para a economia do município, mas a partir da

década de 1970 e, principalmente, nas décadas seguintes, a intensificação da produção agrícola transformou a paisagem rural do município. Ainda de acordo com o mesmo autor, o aumento da produtividade agrícola foi acompanhado pela expansão das áreas de cultivo, com a substituição de culturas de subsistência e da pecuária por monoculturas, como a soja, que se tornou a principal atividade agrícola da região.

Yokoo (2009) aponta ainda, que a introdução de novas tecnologias, como o uso de sementes geneticamente modificadas e o aprimoramento das práticas de manejo do solo, permitiu que a produção agrícola fosse mais eficiente, o que resultou em um aumento considerável das áreas cultivadas e da quantidade de grãos em toneladas ao longo dos anos.

Diante disso, a figura 3 apresenta a evolução da produção de soja em Campo Mourão entre 1991 e 2023. Observa-se um crescimento contínuo na produção ao longo do período. A produção de soja saltou de 25.952 toneladas em 1991 para 108.505 toneladas em 2023, com aumento mais expressivo após 2010. O maior crescimento ocorreu entre 2010 e 2023, refletindo a intensificação da atividade agrícola no município.

Figura 3 – Censo agropecuário de Campo Mourão – produção de Soja 1991 – 2023.



Fonte: IBGE – Censo Agropecuário cidade de Campo Mourão - PR. Adaptado pelo autor (2025).

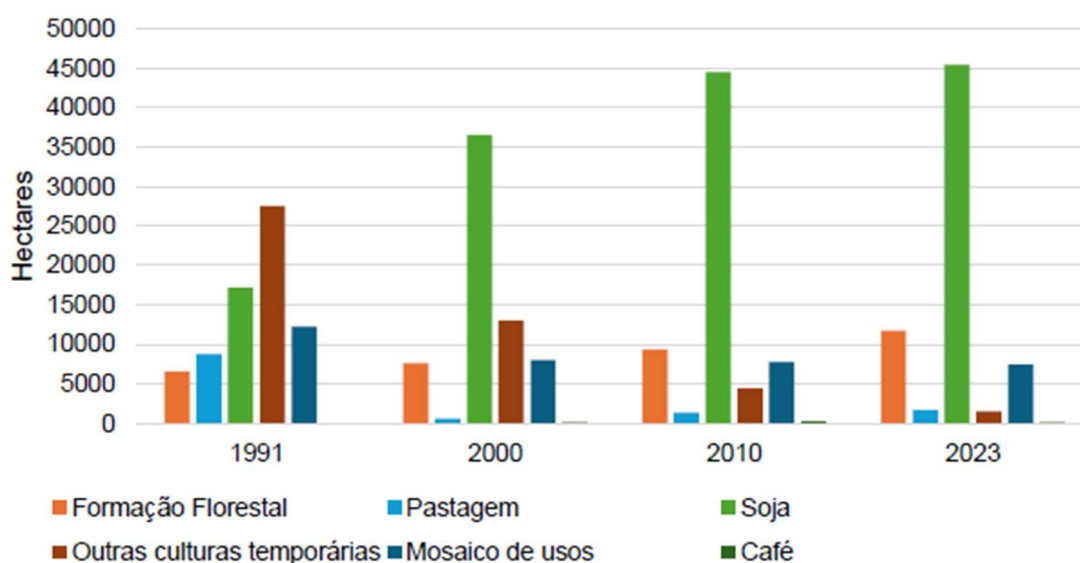
Além disso, de acordo com os dados obtidos pelo IBGE e MapBiomas e conforme a Figura 3, o uso da terra no município de Campo Mourão – PR entre 1991 e 2023 revela profundas transformações causadas principalmente pela

expansão da cultura da soja, que passou de 17.126,9 ha para 45.394,4 ha nesse período. Essa expansão reflete o avanço da agricultura mecanizada e da monocultura, em detrimento da diversidade agrícola e das pastagens, que sofreram queda significativa.

As áreas destinadas a outras culturas temporárias também reduziram drasticamente, indicando uma substituição por lavouras mais rentáveis. A formação florestal apresentou crescimento contínuo, sugerindo provavelmente mais ações de preservação ou recuperação ambiental. O café, apesar de presente, manteve-se com participação reduzida ao longo do período. Já o mosaico de usos foi gradualmente substituído por usos mais definidos, como a agricultura (Figura 4).

Figura 4 – Classes de uso da terra em relação aos hectares no município de Campo Mourão – PR

Uso da Terra	1991	2000	2010	2023
	Hectares			
Formação Florestal	6566,8	7629,9	9344,2	11692,4
Pastagem	8782,7	658,2	1379,2	1691,9
Soja	17126,9	36497,4	44459,4	45394,4
Outras culturas temporárias	27519,8	12928,6	4461,1	1533
Mosaico de usos	12233,7	8017,3	7805,7	7447,2
Café	79,6	138,7	279,6	185,2

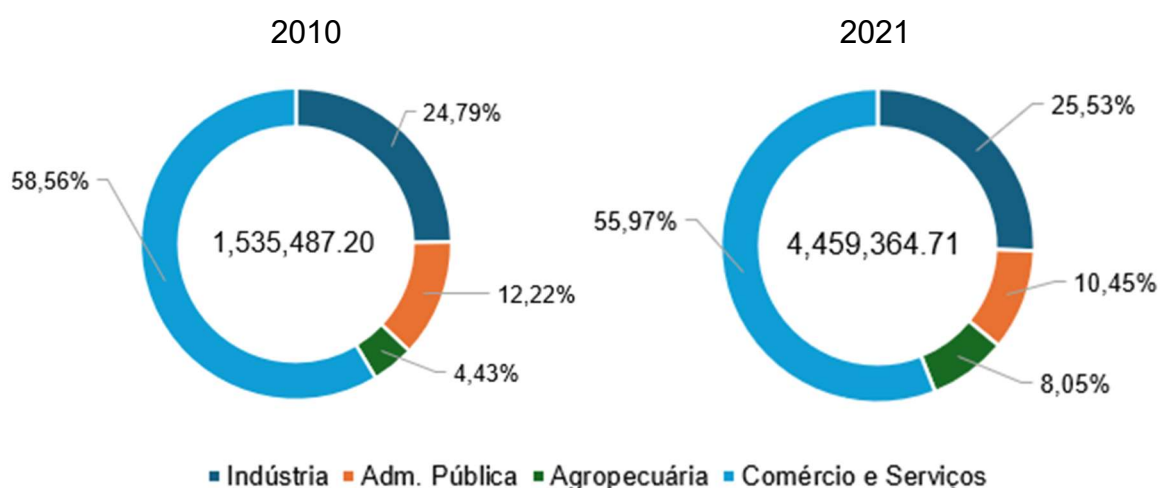


Fonte: MapBiomas. Adaptado pelo autor (2025).

As mudanças no uso da terra evidenciam um processo de modernização e intensificação da atividade agrícola na região. Além disso, é possível observar um aumento na formação florestal, que pode indicar uma resposta às exigências legais ambientais, como reservas legais e áreas de preservação permanente. Em conjunto, os dados apontam para uma paisagem rural cada vez mais voltada à produção intensiva de commodities, especialmente a soja.

Todo esse processo histórico e crescimento do município favoreceu o fortalecimento de sua economia, que tem como principal motor o setor industrial. A partir dos dados do IPARDES (2025) é possível fazer uma pequena comparação entre os anos de 2010 e 2021, que revela um crescimento expressivo no Valor Adicionado Bruto (VAB) de Campo Mourão, que quase triplicou, passando de R\$ 1,53 bilhão para R\$ 4,46 bilhões (Figura 5).

Figura 5 – Resultado total do Valor Adicionado Bruto (VAB) a Preços Básicos (R\$1.000) – Campo Mourão



Fonte: IPARDES. Adaptado pelo autor (2025).

Apesar desse aumento, a estrutura setorial manteve-se estável ao longo dos anos, com Comércio e Serviços permanecendo como principal responsável, ainda que sua participação tenha caído de 58,56% para 55,97%. A Administração Pública apresentou leve elevação na participação, de 12,22% para 10,45%, evidenciando maior peso na economia local. É importante destacar o crescimento da agropecuária, cuja participação quase dobrou, passando de 4,43% para 8,05%, o que indica fortalecimento das atividades rurais e agroindustriais. Por outro lado, o setor de Comércio e Serviços registrou queda

proporcional, de 12,22% para 10,45%, sugerindo um ritmo de crescimento inferior aos demais setores, indicando assim uma economia ainda fortemente industrial, mas com sinais de diversificação e fortalecimento da agropecuária ao longo da década (Figura 6).

Por fim, a região de Campo Mourão consolidou-se como um dos maiores polos produtores de soja do Paraná, acompanhando a tendência estadual e nacional que posicionou a soja entre os principais produtos de exportação. Esse avanço agrícola está diretamente associado ao desenvolvimento industrial, já que ambos os setores são fortemente interligados conforme os dados do PIB apresentados na Figura 6. Embora esse crescimento tenha impulsionado significativamente a economia local, também trouxe desafios ambientais importantes, como a pressão sobre as áreas de vegetação nativa e a necessidade de adotar práticas de manejo sustentável para reduzir os impactos ecológicos (PROCÓPIO, 2008).

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram conduzidas três fases distintas: definição da área de estudo por meio de atividades de gabinete, observações e coleta de amostras em campo e análise laboratorial.

Antes da delimitação da área de estudo, foram realizadas investigações iniciais, envolvendo tanto análises documentais em gabinete quanto visitas no local. Esta primeira etapa foi crucial para um entendimento amplo de toda a paisagem através da análise de imagens de satélite e dados secundários, que facilitaram o reconhecimento da área de estudo. Essas informações foram fundamentais para planejar o trabalho de campo, pois confirmava, através da observação, a relevância da área selecionada para a pesquisa.

É importante destacar que foi realizado um estágio supervisionado na área de estudo, o que contribuiu significativamente para o aprofundamento do conhecimento empírico do local. Essa experiência prática permitiu uma compreensão mais abrangente da realidade local, indo além da identificação detalhada dos elementos naturais e antrópicos, ao possibilitar também à interação com profissionais atuantes na região. Através dessa experiência, as etapas subsequentes da pesquisa, incluindo o trabalho de gabinete, de campo e de laboratório foram organizadas de forma mais clara e seguiram uma lógica de investigação contínua e integrada.

4.1. TRABALHOS DE GABINETE

Os trabalhos de gabinete foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa, pois foram realizados como o eixo central de organização e sistematização das demais etapas.

A primeira etapa da pesquisa foi uma revisão da literatura, onde referências teóricas e metodológicas foram selecionadas para apoiar o desenvolvimento da pesquisa. Com base no levantamento bibliográfico, foi possível definir as ações práticas a serem executadas e as variáveis a serem observadas no campo. Além disso, no gabinete, foram acessados bancos de dados secundários, imagens orbitais, mapas e documentos complementares para a compreensão inicial da área de estudo.

O trabalho de gabinete também foi crucial para o planejamento detalhado da visita de campo, que resultou na definição dos pontos de coleta de dados, equipamentos necessários e procedimentos metodológicos a serem empregados durante a coleta de amostras. Por fim, após as análises laboratoriais, o trabalho de gabinete voltou a ser o principal ambiente, agora para o processamento de dados e discussão dos resultados no contexto da literatura consultada.

4.1.1. Levantamento bibliográfico

Durante a construção desta pesquisa, optou-se por uma revisão bibliográfica consistente, com o objetivo de garantir o respaldo científico necessário no desenvolvimento dos tópicos abordados. Para isso, foram consultadas fontes consolidadas no campo da pesquisa acadêmica e técnica, a fim de aprofundar o entendimento sobre os elementos físicos e sociais que compõem a realidade da área analisada.

A escolha das referências não foi aleatória, foram priorizadas instituições com tradição e dados confiáveis em estudos ambientais e socioeconômicos, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e o Instituto Água e Terra (IAT), cujas publicações oferecem dados atualizados. Também foram consideradas as contribuições do Sistema de Monitoramento e Estudos dos Recursos Naturais do Paraná (MINEROPAR), reconhecido por seus levantamentos geológicos e ambientais regionais.

Além das fontes das instituições descritas anteriormente, foram integrados ao estudo diversos trabalhos acadêmicos, como teses, dissertações e artigos científicos, provenientes de bancos de dados confiáveis e revistas de relevância na área das Ciências Ambientais e Geografia. A análise desses textos permitiu uma abordagem mais abrangente sobre os aspectos que influenciam a dinâmica socioeconômica e ambiental da região de estudo, além de contribuir para o desenvolvimento da fundamentação teórica, oferecendo diferentes perspectivas e aprofundamentos sobre os temas abordados.

4.1.2. Definição da área de estudo

A partir do levantamento bibliográfico, da análise de bancos de dados pré-existent e do conhecimento prévio sobre a área de estudo, foi realizada a seleção de uma vertente para o levantamento das características dos solos.

Com o intuito de avaliar a influência do cultivo da soja nas propriedades físicas e hídricas de solos de textura argilosa, a área de estudo foi selecionada com base na presença de uma lavoura de soja e de uma área de floresta nativa que ocorrem associadas a mesma classe de solo (Latossolo Vermelho de textura argilosa). Ambos os pontos amostrais estão localizados em uma mesma vertente, ocupando mesma posição topográfica, o que permite reduzir a variabilidade natural das características dos solos influenciadas por elementos extrínsecos (relevo, geologia, clima, entre outros) e facilitar a análise comparativa entre as condições de solo manejado e não manejado. A escolha dos Latossolos para a presente pesquisa deve-se a ampla ocorrência dessa classe de solo na área de estudo.

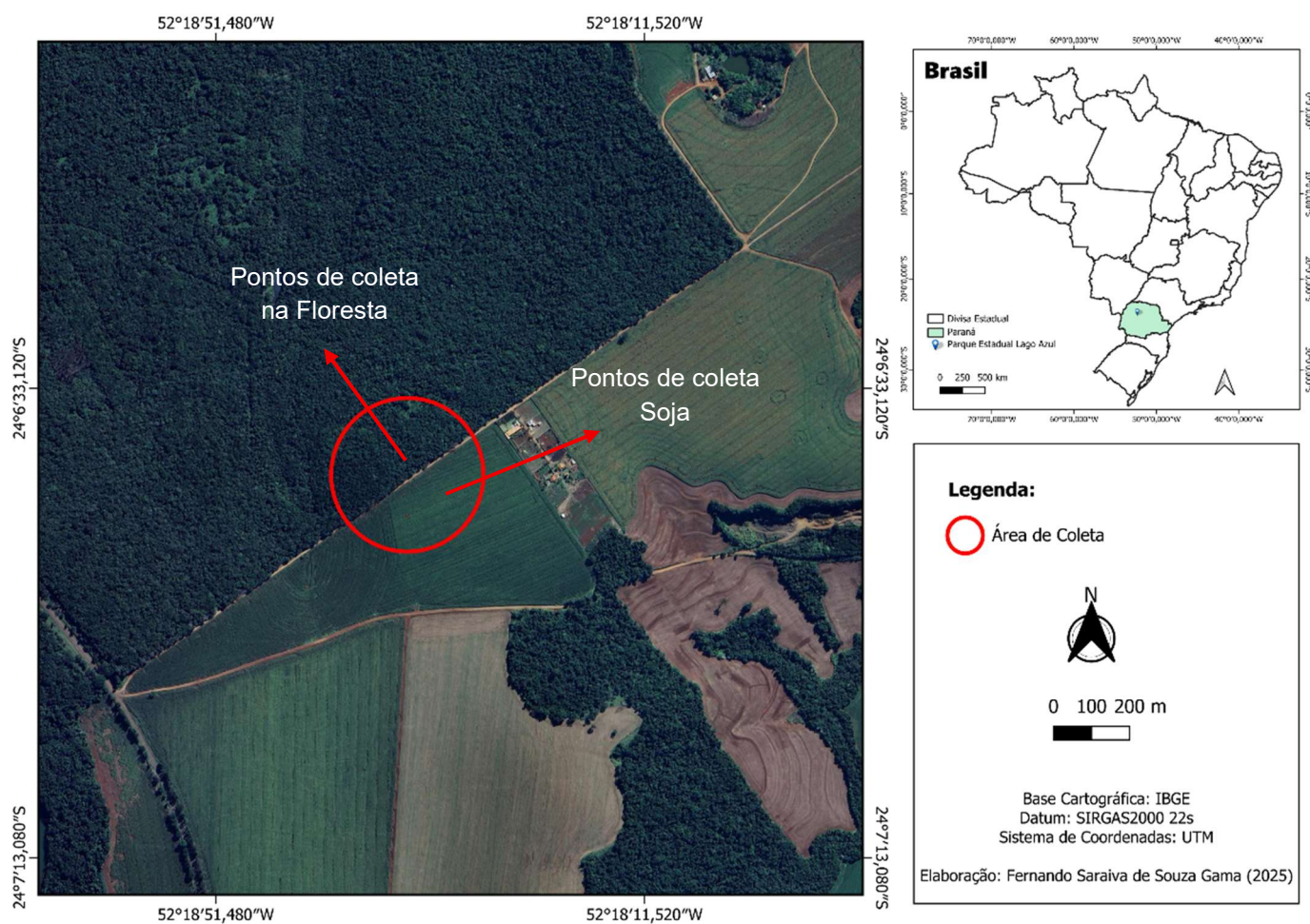
Dessa forma, a área cultivada com soja e a área de floresta foram selecionadas estrategicamente para representar situações contrastantes de uso e cobertura do solo, possibilitando a avaliação dos impactos do manejo agrícola sobre a estrutura, porosidade e capacidade de movimentação de água dos solos.

4.2. TRABALHO DE CAMPO

A etapa prática no campo foi realizada com a abertura de três trincheiras em cada tipo de uso do solo selecionado: uma área com cultivo de soja e outra área com floresta nativa. Em cada trincheira, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas em superfície (0-20 cm) e em subsuperfície (20-35 cm), respeitando os protocolos metodológicos para análises laboratoriais. A escolha de três pontos amostrais por uso da terra visa representar com maior fidelidade as condições médias de cada ambiente, considerando que o solo pode ter variabilidade em uma curta distância de coleta.

As áreas de amostragem foram estabelecidas em um raio de aproximadamente 50 metros entre si, garantindo proximidade no espaço e semelhança dos fatores como relevo e o solo (Figura 6).

Figura 6 - Localização do raio de coleta, no município de Campo Mourão



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Antes da coleta, foi realizada a remoção da camada superficial de serrapilheira ou cobertura vegetal para evitar interferências nos resultados. As coletas foram feitas em duas profundidades padrão: de 0 a 20 cm, representando a camada mais influenciada pelas atividades de manejo ou deposição orgânica, e de 20 a 35 cm (Figura 7), representando o horizonte subsuperficial do solo.

Figura 7 – Trincheira aberta na área de cultivo de soja (20-35cm) para a coleta de amostras



Fonte: Imagens do autor (2025).

A coleta de amostras indeformadas ocorreu por meio dos anéis volumétricos, sendo coletadas 5 amostras por profundidade (duas profundidades) em cada uma das trincheiras (três trincheiras), totalizando 30 amostras por uso da terra. Os anéis foram utilizados em análises laboratoriais para determinar variáveis físicas e hídricas, como a condutividade hidráulica do solo saturado, densidade do solo, além dos índices de macroporosidade, microporosidade e porosidade total, permitindo assim, avaliar possíveis alterações nas propriedades dos solos decorrentes do manejo agrícola em comparação com a floresta preservada.

Além da coleta dos anéis, foram procedidas a coleta de amostras indeformadas, acondicionadas em caixas rígidas, com o objetivo de preservar a estrutura natural do solo, pois essas amostras foram destinadas à realização do ensaio de estabilidade de agregados, que permite avaliar o grau de resistência dos agregados do solo à desagregação, um indicativo importante da qualidade

e da suscetibilidade à erosão sob diferentes usos da terra (WENDLING et al., 2005).

Por último, foram coletadas amostras deformadas, acondicionadas em sacos plásticos, para a determinação da granulometria e análise química do solo.

4.3. TRABALHO EM LABORATÓRIO

Nas análises laboratoriais realizadas neste estudo, foram conduzidos diversos experimentos com o intuito de avaliar as propriedades físicas e hídricas do solo. Entre os ensaios efetuados, destaca-se o teste de condutividade hidráulica com carga constante, que permite verificar a capacidade do solo em transmitir água sob condições de saturação. Também foram determinados os teores de macroporos e microporos, assim como a porosidade total (EMBRAPA, 2017).

Adicionalmente, foi analisado a densidade do solo, fator importante para avaliar a compactação e o impacto do manejo agrícola, e a estabilidade de agregados, que indica a resistência dos agregados do solo à desagregação quando submetidos à ação da água. Os estudos de granulometria foram aplicados para determinar a proporção relativa das frações de areia, silte e argila, permitindo a classificação de textura do solo. Por fim, a quantificação do carbono orgânico forneceu informações relevantes sobre a qualidade do solo (CASTRO FILHO et al., 1998; WENDLING et al., 2005).

Para a execução de todos os ensaios mencionados, foram seguidos os procedimentos metodológicos estabelecidos no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (2017), assegurando que o trabalho fique padronizado e confiável em relação a outros trabalhos já realizados anteriormente.

4.3.1 Análise Hídrica

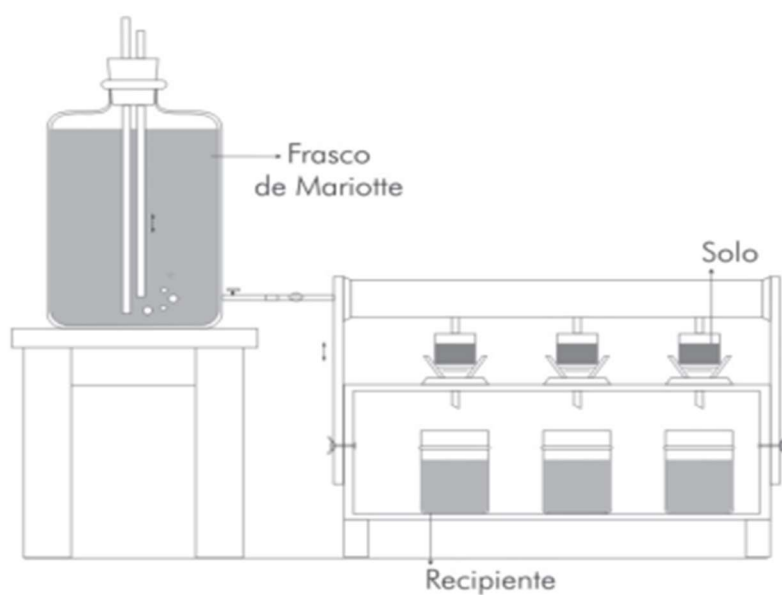
A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) emerge como um parâmetro crucial para analisar a dinâmica hídrica do solo. A determinação de K_{sat} oferece informações sobre a velocidade de movimentação da água no espaço poroso do solo, sendo vital para entender sua estrutura e comportamento hidráulico. Diversos métodos laboratoriais têm sido empregados para essa medição, como

o uso do permeâmetro de carga constante, recomendado para solos com alta K_{sat} (GONÇALVES E LIBARDI, 2013)

No procedimento de laboratório, foram preparadas inicialmente 36 amostras de solo, distribuídas em três ensaios com 10 amostras cada e um ensaio final com 6 amostras, sendo que cada trincheira forneceu 6 amostras (3 amostras em superfície e 3 amostras em subsuperfície). Cada amostra foi acondicionada em um cilindro e, sobre ela, fixou-se com fita impermeável um segundo cilindro vazio, de mesmo diâmetro e altura de 2 cm, o que permitiu aumentar o nível da coluna de água sem alterar o diâmetro da amostra. Em seguida, os conjuntos foram parcialmente submersos em uma bandeja com água, permitindo que a saturação do solo ocorresse por capilaridade. Esse método garante uma distribuição homogênea da umidade nas amostras, condição essencial para a uniformidade e confiabilidade das análises de condutividade hidráulica realizadas posteriormente.

Após atingir a saturação adequada, os conjuntos foram cuidadosamente posicionados em um suporte específico do equipamento conhecido como permeâmetro, conforme a Figura 8 e Figura 9. Esse dispositivo foi ajustado para manter um fluxo constante de água verticalmente através da amostra de solo. A água infiltrada foi coletada em béqueres situados logo abaixo das amostras, possibilitando medições periódicas. As leituras dos volumes foram realizadas em intervalos regulares de 1 hora, durante um período contínuo de 8 horas, permitindo a análise do comportamento da condutividade do solo ao longo do tempo.

Figura 8 – Modelo de permeâmetro com carga constante



Fonte: Marques et al. (2008).

Figura 9 – Permeâmetro utilizado para a determinação da condutividade hidráulica saturada



Fonte: Imagens do autor (2025).

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi obtida a partir da medição do volume de água que atravessou a amostra de solo, considerando ainda a área do cilindro e o intervalo de tempo de duração do ensaio. Esse cálculo segue uma fórmula específica que relaciona esses parâmetros,

permitindo quantificar a capacidade do solo em transmitir água quando se encontra em condição de saturação, conforme a Equação abaixo:

$$K_{\text{sat}} = \left(\frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot T} \right)$$

Nesta equação, K_{sat} representa a condutividade hidráulica do solo saturado, expressa em centímetros por hora (cm/h). O termo Q refere-se ao volume de água que percolou pela amostra, medido em mililitros (ml). A variável L corresponde à altura do perfil de solo dentro do cilindro, em centímetros (cm), enquanto A indica a área do cilindro, também em centímetros quadrados (cm²); H representa a soma da altura do bloco de solo com a altura da coluna de água aplicada sobre ele, expressa em centímetros (cm). Por fim, t é o tempo de duração do ensaio, registrado em horas.

Para interpretar a variabilidade dos atributos físicos do solo, foi adotada a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), amplamente utilizada em estudos de solo. Essa classificação considera o coeficiente de variação (CV%) como um indicador do grau de dispersão dos dados, sendo categorizado em: baixa variabilidade ($CV < 12\%$), média variabilidade ($12\% \leq CV < 60\%$) e alta variabilidade ($CV \geq 60\%$), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do Coeficiente de Variação (CV%)

Classificação do CV	Intervalo (%)	Cor Indicativa
Baixa Variabilidade	$CV < 12$	Amarelo Claro
Média Variabilidade	$12\% \leq CV < 60\%$	Laranja
Alta Variabilidade	$CV \geq 60\%$	Vermelho

Fonte: Warrick e Nielsen (1980) * e adaptado pelo Autor (2025)

De acordo com Warrick e Nielsen (1980), essa abordagem permite avaliar com maior precisão o grau de uniformidade ou heterogeneidade dos parâmetros analisados, como densidade do solo, porosidade e condutividade hidráulica.

4.3.2 Análises Físicas

Para avaliar as condições físicas dos solos, foram analisados diversos parâmetros importantes, como a granulometria (tamanho das partículas do solo), a estabilidade dos agregados do solo medida pelo diâmetro médio dos agregados, além da microporosidade, macroporosidade, porosidade total e densidade do solo. Para realizar essas análises, foram seguidos os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (2017).

4.3.2.1. Granulometria

A determinação da granulometria do solo foi realizada conforme o protocolo descrito por Embrapa (2017), com base no método da pipeta, após dispersão química e mecânica das amostras.

Inicialmente, foram pesados 20g de terra fina seca ao ar (TFSA) em béqueres de 250 ml. Em cada amostra adicionou-se 40 ml de solução dispersante de NaOH 1 mol L⁻¹. O volume foi então completado até 100 ml com água destilada e a suspensão homogeneizada com bastão de vidro. As amostras permaneceram em repouso por aproximadamente 16 horas para permitir a ação completa do dispersante.

Após esse período, o conteúdo foi transferido para o copo metálico de um agitador mecânico, adicionando-se 300ml de água destilada. A agitação foi realizada por 10 minutos e após a dispersão mecânica, o material foi lavado em peneiras, utilizando malha de 53 µm, com auxílio de funil e proveta graduada de 1.000 ml. A fração retida (areia) foi transferida para béquer tarado, seca em estufa a 105 °C por 24 horas e pesada após resfriamento em dessecador.

O material passante (silte + argila) teve o volume completado na proveta até 1.000ml com água destilada. Preparou-se também uma amostra em branco (prova branca), contendo os mesmos volumes de dispersante e água destilada utilizados nas amostras, para posterior correção da massa do dispersante nas frações medidas.

A temperatura da suspensão foi registrada para o cálculo do tempo de sedimentação das frações, conforme a equação da lei de Stokes. Após

homogeneização manual durante 1 minuto, foram coletadas alíquotas com pipeta em dois tempos distintos: uma alíquota de 20ml a 10cm de profundidade (silte + argila) e, posteriormente, outra alíquota de 20ml a 5cm (apenas argila). As alíquotas foram transferidas para béqueres de 50ml de massa conhecida, levadas à estufa a 105 °C por 24 horas e, após resfriamento em dessecador, pesadas em balança analítica.

A análise granulométrica foi expressa em percentuais conforme as equações abaixo:

- 1- Teor de argila = $[Argila(g) - dispersante(g)] \times 500$
- 2- Teor de silte = $500 - [Argila(g) + Areia(g)]$
- 3- Teor de areia = $Areia(g) \times 5$

4.3.2.2. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total

A porosidade diz respeito aos espaços vazios presentes entre e dentro dos agregados do solo, os quais podem ser ocupados por água ou ar, portanto, a porosidade é um parâmetro fundamental para a análise das condições físico-hídricas do solo, pois influencia diretamente na capacidade de infiltração, movimentação e armazenamento da água no perfil do solo (GONÇALVES; MORAES, 2012).

Com base no método da mesa de tensão descrito pela Embrapa (2017), foram determinadas a microporosidade (M_i), a macroporosidade (M_a) e a porosidade total (P_t) do solo, essa obtida pela soma dos dois primeiros parâmetros. Assim como no ensaio de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), essas variáveis foram avaliadas em triplicatas, sendo adotada a média dos valores obtidos para cada ponto.

No laboratório, os anéis volumétricos contendo as amostras de solo foram inicialmente saturados com água e, em seguida, pesados para obtenção do peso da amostra saturada (a). Após essa etapa, as amostras foram colocadas na mesa de tensão (Figura 10), onde foram submetidas a uma pressão de 0,006 MPa (equivalente a 60 cm de coluna de água). Essa pressão causa a drenagem da água contida nos macroporos, por meio da força de sucção gerada pela mesa.

Figura 10 – Mesa de Tensão utilizada na determinação da macroporosidade e microporosidade



Fonte: Imagens do autor (2025).

Após a drenagem da água dos macroporos, as amostras foram transferidas para vasilhas metálicas com pesos previamente conhecidos, permitindo a pesagem após a aplicação da tensão, a fim de determinar o teor de água retido nos microporos.

A macroporosidade foi determinada por gravimetria, utilizando-se a diferença entre peso da amostra saturada e o peso obtido após a aplicação da tensão de 0,006 MPa. O resultado dessa subtração foi dividido pelo volume do anel utilizado, conforme apresenta a equação a seguir:

$$Ma = \left(\frac{a - b}{d} \right) \cdot 100$$

Em que, Ma representa a macroporosidade, expressa em (%); “a”, é o peso da amostra totalmente saturada, em gramas (g); “b”, corresponde ao peso da amostra após a aplicação da tensão de 0,006 MPa, também em gramas (g); e “d”, é o volume do anel volumétrico utilizado, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

Para determinar a microporosidade, as amostras, após serem submetidas à tensão conhecida, foram levadas à estufa por 24 horas a uma temperatura de 105 °C. Depois desse período, as amostras foram retiradas da estufa, deixadas esfriar em dessecadores e, em seguida, pesadas, obtendo-se o peso da amostra seca, denominado c, conforme a equação abaixo:

$$M_i = \left(\frac{b - c}{d} \right) \cdot 100$$

Em que, M_i representa a microporosidade, expressa em (%); “b”, é o peso da amostra após ser submetida a tensão, medido em gramas (g); “c”, corresponde ao peso da amostra seca a 105 °C, também em gramas (g); e “d”, é o volume do anel volumétrico utilizado, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

Por fim, a porosidade total foi obtida após a somatória dos valores da macroporosidade e microporosidade, conforma equação abaixo:

$$P_t = M_a + M_i$$

Em que P_t é a representação da porosidade total em porcentagem (%); M_a é a macroporosidade também em (%) e M_i , a microporosidade (%).

4.3.2.3. Densidade do Solo

A densidade do solo é um parâmetro crucial para avaliar a qualidade física do solo, pois fornece informações importantes sobre o seu grau de compactação, ou seja, quanto maior a quantidade de massa sólida presente em um determinado volume de solo, maior será a sua densidade (CORRECHEL, 1998).

A determinação da densidade do solo foi realizada com base na metodologia proposta pela Embrapa (2017), utilizando as amostras previamente empregadas nos ensaios de porosidade (microporosidade, macroporosidade e porosidade total) e de condutividade hidráulica saturada. Para o cálculo da densidade, considerou-se exclusivamente a massa da amostra seca em estufa (c), obtida após 24 horas de secagem a 105 °C, bem como o volume do cilindro de coleta, conforme expressa a equação abaixo:

$$D_s = \frac{M_s}{V}$$

Onde D_s = é representado pela densidade do solo, em gramas por centímetros cúbicos (g.cm^{-3}); M_s = é a massa de solo seco, em gramas (g) e V é o volume do anel, em centímetros cúbicos (cm^3).

4.3.2.4. Estabilidade de agregados via seca

A estabilidade dos agregados pode ser expressa pelo diâmetro médio ponderado dos agregados e constitui um importante indicativo dos processos relacionados à degradação do solo. Essa importância se deve ao papel essencial que os agregados exercem na organização estrutural do solo, visto que a integridade do solo é frequentemente comprometida por intervenções intensas e pelas constantes variações presentes em áreas destinadas à atividade agrícola (CASTRO et al., 1998).

A determinação do diâmetro médio ponderado dos agregados foi realizada pelo método via seca, utilizando um agitador de peneiras. Foram procedidas 5 repetições para cada amostra indeformada coletada, totalizando 15 repetições em superfície e 15 em subsuperfície para cada uso da terra.

Para a realização do ensaio, as amostras indeformadas foram destorroadas manualmente e transferidas para uma peneira com abertura de 8 mm. O material passante foi pesado (100g) e alocado em uma vasilha plástica de peso conhecido. Posteriormente, o material foi transferido para um agitador mecânico vibratório equipado com peneiras de malhas com aberturas de 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm e 0,25 mm (Figura 11). As amostras foram submetidas à agitação com frequência de 9 Hz durante 10 minutos.

Figura 11 – Agitador com jogo de peneiras utilizados na determinação da estabilidade de agregados via seca



Fonte: Imagens do autor (2025).

Após a separação, os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para recipientes previamente pesados e levados à estufa a 105 °C por um período de 24 horas (Figura 12). Após o tempo de secagem, os materiais foram resfriados em dessecadores e, então, pesados.

Figura 12 – Imagem ilustrativa dos recipientes utilizados para pesagem dos agregados separados em classes de tamanho



Fonte: Imagens do autor (2025).

Com base nesses dados, foi calculado o Diâmetro Médio Ponderado dos Agregados (DMPA), utilizado como parâmetro de avaliação da estabilidade dos agregados do solo pela equação abaixo proposta por Younger e McGuinness (1956).

$$DMPA = \sum (C_{mm} \times P)$$

Onde “C_{mm}” representa o centro das classes de tamanho dos agregados, em milímetros (mm); “P”, representa a proporção do peso de cada fração de agregados em relação ao peso da amostra, em gramas (g).

4.3.3. Análise Química

A análise de carbono orgânico foi realizada no Laboratório de Pedologia da Universidade Estadual de Maringá (UEM), vinculado ao Departamento de Geografia, conforme os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017). O carbono orgânico foi determinado por meio do método de Walkley-Black (1934), que se baseia na oxidação química da matéria orgânica com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) em meio ácido, seguida de titulação do excesso de dicromato com solução de sulfato ferroso. Esse método fornece uma estimativa indireta da quantidade de carbono orgânico presente no solo (EMBRAPA, 2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. GRANULOMETRIA

Em relação a granulometria, a Tabela 3 apresenta os teores médios de areia, silte e argila em um Latossolo Vermelho sob cultivo de soja e vegetação de floresta, nas profundidades de 0–20 cm e 20–35 cm. Independente do uso da terra, os solos analisados apresentaram teores elevados de argila, variando de 689 a 809 g kg⁻¹, caracterizando uma textura muito argilosa, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2017).

Tabela 3 – Teores de Areia, Silte, Argila e classificação textural do Latossolo nos usos com soja e floresta

Uso do Solo	Profundidade (cm)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Classificação Textural*
Soja	0 – 20	49	225	726	Muito Argilosa
Soja	20 – 35	46	146	809	Muito Argilosa
Floresta	0 – 20	51	260	689	Muito Argilosa
Floresta	20 – 35	51	143	806	Muito Argilosa

Fonte: SIBCS (2018) * e adaptado pelo Autor (2025).

Nos perfis sob cultivo de soja, o teor de argila foi de 726 g kg⁻¹ no horizonte de 0–20 cm e aumentou para 809 g kg⁻¹ na profundidade de 20–35 cm. O silte apresentou redução de 225 para 146 g kg⁻¹ entre as mesmas profundidades, enquanto a areia manteve-se em valores muito baixos, sendo de 49 g kg⁻¹ e 46 g kg⁻¹, respectivamente.

No solo sob floresta, o teor de argila foi de 689 g kg⁻¹ no horizonte superficial e aumentou para 806 g kg⁻¹ em subsuperfície. O teor de silte foi de 260 g kg⁻¹ na superfície, superior ao observado no solo sob soja, e reduziu-se para 143 g kg⁻¹ na subsuperfície. A areia apresentou valor constante de 51 g kg⁻¹ em ambos os horizontes.

5.2. DENSIDADE DO SOLO E POROSIDADE

A densidade do solo é um parâmetro físico importante para avaliar a compactação e a qualidade estrutural do solo, sendo influenciada por fatores como o uso da terra, o manejo adotado e a profundidade do local analisado. Os resultados obtidos (Tabela 4) permitiram observar variações nos valores de densidade, refletindo as alterações causadas pelas práticas agrícolas e pelas características naturais da vegetação nativa.

Tabela 4 – Valores médios de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) nos usos com soja e floresta

Uso do Solo	Profundidade (cm)	Ds (g cm ⁻³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
Soja	0 – 20	1,01	4,24	54,21	58,45
Soja	20 – 35	1,15	3,67	50,21	53,59
Floresta	0 – 20	0,68	9,55	55,97	65,52
Floresta	20 – 35	0,81	7,92	56,31	64,23

Fonte: Autor (2025).

É possível observar que os solos sob cultivo de soja apresentaram maiores valores de densidade em ambas as profundidades, sendo 1,01 g cm⁻³ no horizonte superficial (0–20 cm) e 1,15 g cm⁻³ no subsuperficial (20–35 cm). Já os solos sob cobertura florestal apresentaram densidades mais baixas, sendo de 0,68 g cm⁻³ e 0,81 g cm⁻³, respectivamente, para as mesmas profundidades. Os resultados de densidade do solo em floresta se assemelham aos obtidos por Marcatto e Silveira (2016) em Latossolo Vermelho de textura argilosa da região norte do Paraná, cujo valor médio em superfície foi de 0,74 g cm⁻³.

A densidade do solo foi, respectivamente, 48% maior na camada superficial e 41% maior na subsuperficial sob cultivo de soja, em comparação com a área de vegetação natural. Os resultados seguem o que foi descrito por Reichert et al. (2007), que indicam que o manejo agrícola, caracterizado pelo tráfego de máquinas pesadas, preparo intensivo do solo e ausência de cobertura vegetal permanente, promove maior compactação do solo. Conforme Silva et al. (2006), esse processo reduz os espaços porosos, dificultando a entrada de ar e água e prejudicando o desenvolvimento radicular, ou seja, solos cultivados

tendem a apresentar maior densidade devido à degradação estrutural provocada pelas atividades mecanizadas, que intensificam a compactação e diminuem a porosidade total do solo.

Deve-se mencionar ainda, que a densidade do solo no horizonte subsuperficial da soja se aproxima dos valores críticos mencionados por Reichert et al. (2003). A partir de um levantamento bibliográfico realizado pelos autores, definiu-se que valores de D_s superiores a $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ são considerados críticos para o desenvolvimento de plantas em solos de textura muito argilosa.

Por outro lado, os solos sob floresta exibiram densidades menores entre os horizontes, dessa forma, é possível evidenciar que os solos de florestas possuem uma estrutura mais preservada, resultante da constante adição de matéria orgânica, maior atividade biológica e ausência de processos físicos significativos (SILVA et al., 2020). Assis et al. (2015) destacam que a vegetação nativa promove maior estabilidade dos agregados e melhora as propriedades físicas do solo, mantendo elevada porosidade e reduzindo a compactação.

É possível destacar ainda, que a variação da densidade com a profundidade é maior em áreas cultivadas, ou seja, no solo sob soja, observa-se aumento de densidade de $1,01$ para $1,15 \text{ g cm}^{-3}$ entre a camada superficial e a subsuperficial. Esse processo pode ser explicado pela pressão que é exercida pelo maquinário agrícola na superfície, que se acumula nas camadas inferiores, dificultando sua recuperação. Adicionalmente, Reichert et al. (2007) observaram que a compactação tende a se intensificar em profundidade devido à menor presença de raízes e organismos que contribuem para a bioturbação, diferente do solo sob florestas que possui uma rica e conectada presença de raízes e microrganismos que ajudam nesse processo.

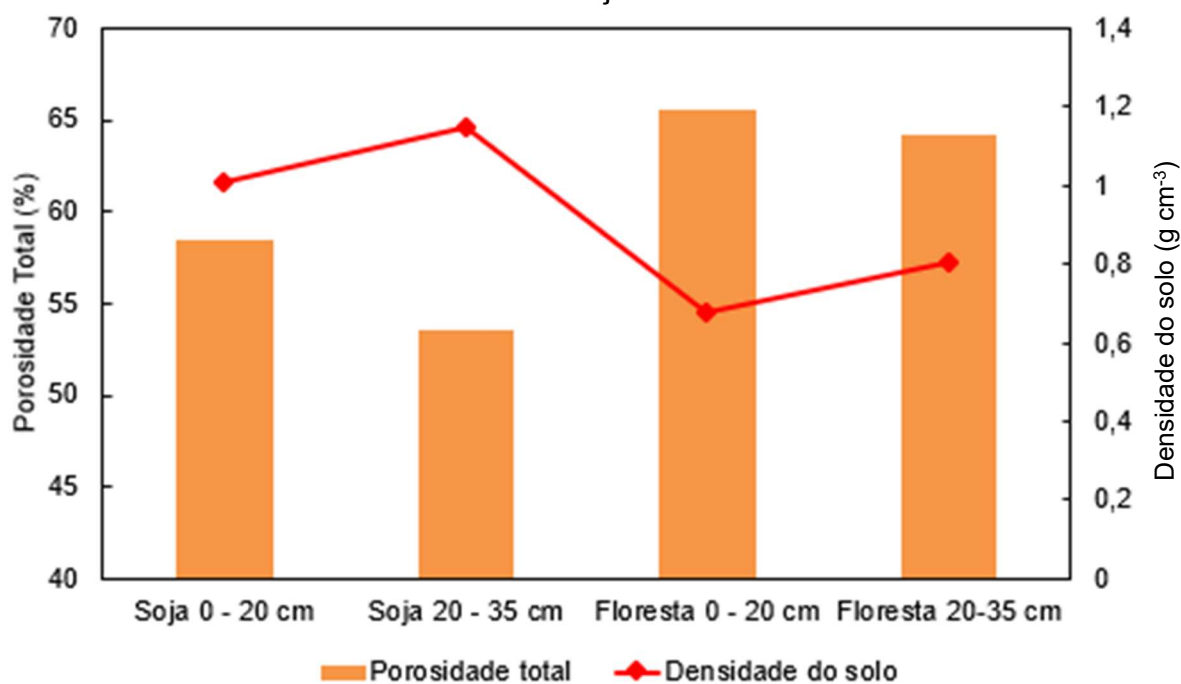
A relação entre densidade do solo e porosidade total também fica evidente. Solos sob floresta apresentaram maiores valores de porosidade total ($65,52\%$ e $64,23\%$ em superfície e subsuperfície, respectivamente), enquanto os de soja mostraram valores menores ($58,45\%$ em superfície e $53,59\%$ em subsuperfície). Essa diferença é significativa, pois a porosidade influencia diretamente na capacidade de retenção e movimentação de água no solo.

O resultado está em conformidade com Tormena et al. (1998), que afirmam que práticas agrícolas aumentam a densidade do solo, reduzindo a sua porosidade e comprometendo a sua estrutura física, o que interfere

negativamente no crescimento das plantas e na infiltração de água. A Figura 13 mostra os valores de densidade e porosidade total para os diferentes usos do solo e profundidades. É possível notar que à medida que a densidade aumenta, a porosidade total diminui, demonstrando a relação inversamente proporcional entre as variáveis.

Esse comportamento reforça as pesquisas de Reichert et al. (2007), que relatam que a compactação do solo reduz os espaços porosos, sobretudo os macroporos, afetando diretamente a infiltração de água e a aeração em solos cultivados. Por outro lado, os solos sob floresta, com cobertura vegetal constante e ausência de perturbações mecânicas, preservam melhor sua estrutura e porosidade natural.

Figura 13 – Relação entre porosidade total (%) e densidade do solo (g cm^{-3}) nos usos com soja e floresta



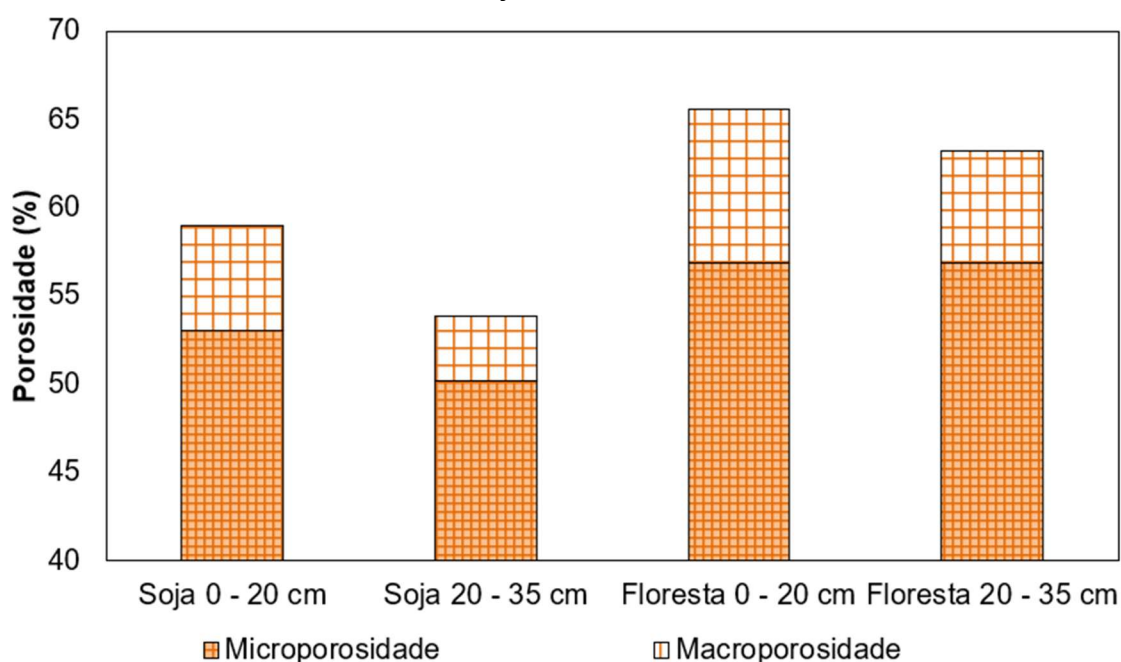
Fonte: Autor (2025).

Ainda sobre os dados apresentados, é importante detalhar os componentes da porosidade total, apresentando separadamente os valores de macroporosidade e microporosidade, conforme a Figura 14. É possível observar que os solos de floresta mantêm maior proporção de macroporos (7,92% a 9,55%), enquanto os de soja apresentaram valores consideravelmente mais baixos (4,24% e 3,67%). Isso é importante, pois a macroporosidade está

associada a circulação de ar e a infiltração rápida de água. A microporosidade, por sua vez, se manteve mais estável entre os usos, com variações menos acentuadas, indicando que a compactação tende a afetar mais diretamente os poros maiores (TORMENA et al., 1998).

Essas diferenças refletem o impacto do manejo do solo, pois em áreas florestais, a presença contínua de matéria orgânica, a não perturbação do solo com maquinário ou pisoteamento e a ação constante das raízes promovem a formação e manutenção de macroporos, essenciais para a aeração, infiltração de água e crescimento radicular (HORN et al., 2003). Já em áreas agrícolas, a utilização de máquinas pesadas, a ausência de cobertura vegetal permanente e o pisoteio contribuem para a destruição da estrutura do solo e a compactação, que afeta especialmente os macroporos (REICHERT et al., 2007).

Figura 14 – Distribuição da macroporosidade e microporosidade nos usos com soja e floresta



Fonte: Autor (2025).

A microporosidade apresentou menor variação entre os usos do solo e profundidades, sendo um pouco superior nos solos sob soja. Esta diferença pode ser explicada pelo fechamento dos macroporos e a reorganização das partículas do solo, que, ao se compactarem, reduzem os poros maiores e aumentam os menores (REICHERT et al., 2007). O autor ainda indica que essa substituição

de macroporos por microporos, embora aumente a retenção de água, prejudica sua disponibilidade para as plantas, pois a água fica retida com mais força nos microporos.

De acordo com os estudos de Pagliai et al. (2004), o equilíbrio entre macro e microporos é fundamental para a qualidade física do solo. Dessa forma, é possível inferir que os solos saudáveis apresentam proporções adequadas de ambos (Ma e Mi), garantindo tanto a retenção quanto o fluxo de água e ar, como é possível identificar nos dados de floresta, tanto superficial quanto subsuperficial. No entanto, a redução drástica da macroporosidade, como observada nos solos cultivados com soja, indica limitação funcional, especialmente para a circulação de água (PAGLIAI et al., 2004).

Por fim, a partir dos dados expostos, fica evidente que os sistemas agrícolas comprometem fortemente a estrutura do solo ao reduzir a macroporosidade, limitando o desenvolvimento da produção agrícola ao longo dos anos. No entanto, os impactos não se restringem à esfera produtiva, pois, a degradação do solo também acarreta sérias consequências ambientais, como o assoreamento de corpos hídricos, a eutrofização, a redução da qualidade e quantidade da água e o aumento do risco de enchentes, efeitos que se estendem para além do local de origem da degradação (MARIOTI et al., 2013). Blanco-Canqui e Lal (2004) reforçam ainda que a manutenção ou recuperação da macroporosidade pode ser alcançada por práticas que sejam mais conservacionistas, como o plantio direto, a rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura, como a forragem, auxiliando na proteção da estrutura física do solo.

5.3. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (KSAT)

Os dados obtidos evidenciam a influência do uso da terra sobre a condutividade hidráulica do solo (Ksat). Conforme apresentado na Tabela 5, os valores de Ksat foram significativamente mais elevados nas áreas de floresta em ambas as profundidades analisadas (0–20 cm: 1291,30 mm/h; 20–35 cm: 662,00 mm/h), em contraste com os valores muito inferiores observados sob cultivo de soja (0–20 cm: 312,90 mm/h; 20–35 cm: 6,50 mm/h). Observa-se que, na camada superficial, a condutividade hidráulica sob cultivo de soja é

aproximadamente 4 vezes menor do que sob floresta, enquanto na subsuperfície essa redução é ainda mais acentuada, sendo cerca de 101 vezes menor. Esses dados indicam que o solo em áreas de vegetação nativa possui maior capacidade de infiltração de água, possivelmente devido à preservação da estrutura do solo (TORMENA et al., 1998).

Tabela 5 – Condutividade hidráulica saturada (Ksat) e Coeficiente de Variação (CV%) por uso do solo e profundidade.

Uso do Solo	Profundidade (cm)	Ksat (mm/h)	CV (%)	Classificação de Variabilidade em classes
Soja	0 – 20cm	312,90	124,2	Alta
Soja	20 – 35cm	6,50	53,1	Média
Floresta	0 – 20cm	1291,30	39,7	Média
Floresta	20 – 35cm	662,0	38,2	Média

Classificação de Variabilidade CV

CV < 12% = Baixa

12% ≤ CV < 60% = Média

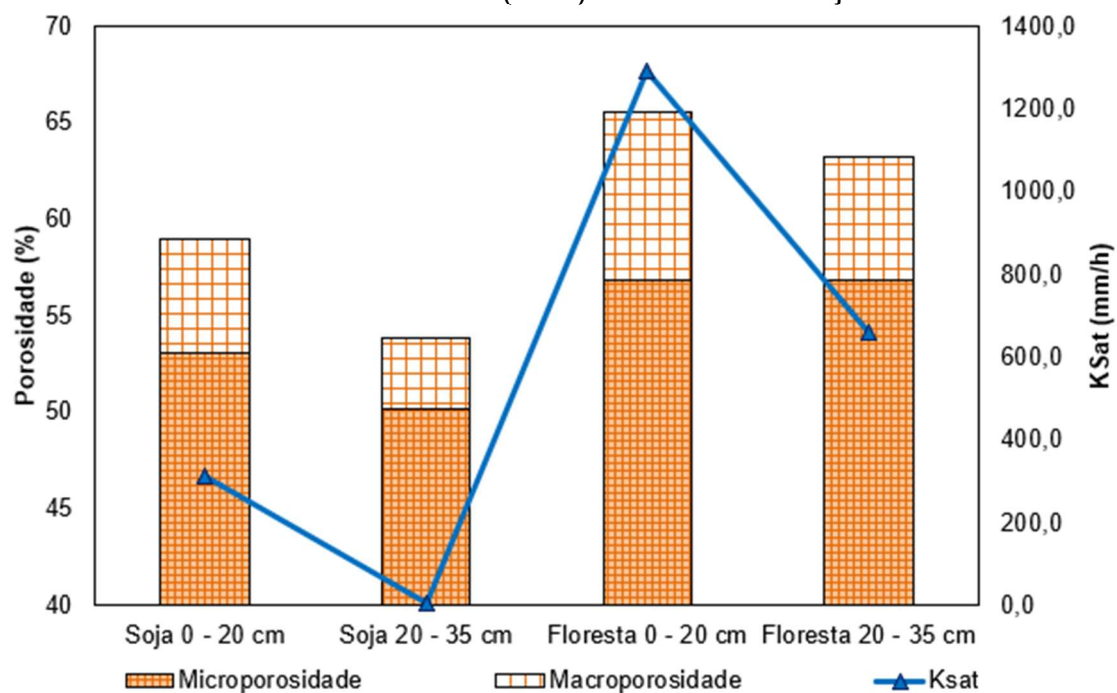
CV ≥ 60% = Alta

*Classes determinadas por Warrick e Nielsen (1980), adaptado pelo Autor (2025).

Fonte: Autor (2025).

Esse padrão é reforçado na Figura 15 quando é demonstrado que os solos sob floresta apresentam maior macroporosidade e porosidade total, ou seja, atributos fundamentais para o movimento da água no solo (TORMENA et al., 1998). Em contraste, os solos cultivados com soja exibem redução desses atributos, especialmente da macroporosidade, o que contribui para os baixos valores de Ksat observados (GONÇALVES e LIBARDI, 2013). Dessa forma, os gráficos demonstram de forma integrada que o manejo agrícola, ao alterar a estrutura física do solo, influencia negativamente a condutividade hidráulica, corroborando estudos como os de Gonçalves e Libardi (2013), que destacam a importância da preservação da estrutura do solo para o bom funcionamento hidrológico.

Figura 15 – Relação entre macroporosidade, microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica (Ksat) nos usos com soja e floresta



Fonte: Autor (2025)

Baseado nos autores citados e nos resultados obtidos nesta pesquisa, é possível inferir que a degradação da estrutura física do solo, provocada pelo manejo agrícola, compromete diretamente a funcionalidade hídrica do solo.

Essa tendência também foi confirmada pelos dados de coeficiente de variação (CV%) da condutividade hidráulica do solo, que revelaram diferentes níveis de variabilidade entre os usos e profundidades, conforme os resultados apresentados na Tabela 5.

Em ambos os perfis analisados, os solos sob floresta apresentaram coeficientes de variação relativamente semelhantes, com 39,7% na camada de 0–20 cm e 38,2% na de 20–35 cm, que vai de encontro com as análises anteriores, pois é um solo sem a interferência direta do manejo, o que mantém suas características naturais. Neste uso, a variabilidade foi classificada como média em ambas as profundidades, considerando as classes de variabilidade propostas por Warrick e Nielsen (1980). No entanto, essa variabilidade não representa um indicativo de degradação da estrutura do solo, mas sim evidencia um sistema estável e preservado, pois a avaliação da qualidade estrutural do solo vai além dos parâmetros físicos tradicionais, podendo estar relacionada à atuação da fauna edáfica, ao maior grau de agregação das partículas e à

presença de poros estruturais, pois esses fatores contribuem para uma maior eficiência na infiltração de água em solos com estrutura preservada (GONÇALVES e LIBARDI, 2013).

Os solos cultivados com soja apresentaram maiores variabilidades, com destaque para a camada superficial (0–20 cm), que atingiu um coeficiente de variação de 124,2%, classificado como de alta variabilidade. Esse comportamento reflete a influência de práticas de manejo intensivo, como preparo mecânico do solo, tráfego de máquinas agrícolas e ausência de cobertura vegetal permanente, fatores que comprometem a uniformidade da estrutura do solo (MARQUES et al., 2008). Assim, a elevada dispersão nos dados pode ser atribuída à heterogeneidade provocada pelo uso agrícola. É importante ressaltar que as trincheiras em que foram procedidas as coletas de amostras foram realizadas tanto na linha de plantio quanto na entrelinha, sendo esta última a faixa mais sujeita à compactação por conta da passagem das rodas dos maquinários, o que pode ter contribuído para a variabilidade dos dados. Esses fatores promovem a desestruturação do solo, afetando especialmente os macroporos responsáveis pela condução preferencial da água (TORMENA et al., 1998; REICHERT et al., 2007).

Por fim, é importante salientar a relação entre intensidade de chuva e infiltração no solo, pois elas demonstram que chuvas de baixa intensidade, quando superiores à capacidade de infiltração, já podem gerar escoamento superficial (CORRADINI et al., 2018). No solo cultivado com soja, o valor reduzido de Ksat em subsuperfície favorece a rápida saturação desse horizonte mesmo em chuvas de pouca intensidade, aumentando o risco de formação do escoamento superficial e, conseqüentemente, de erosão. Isso reforça a importância do manejo que preserve a estrutura física do solo para manter a sua capacidade de infiltração (CORRADINI et al., 2018).

5.4. ESTABILIDADE DE AGREGADOS

O diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA) no Latossolo estudado apresentou valores bastante próximos entre os diferentes usos da terra e profundidades analisadas. No solo sob cultivo de soja, o DMPA foi de 2,6 mm no horizonte superficial (0–20 cm) e de 2,5 mm no horizonte subsuperficial (20–

35 cm). No solo sob vegetação de floresta, os valores foram de 2,3 mm e 2,5 mm nos respectivos horizontes.

Em relação aos agentes que atuam na agregação das partículas de solos, como os teores de carbono orgânico e de argila, observou-se que o carbono orgânico (CO) variou de 31,1 g dm⁻³ para 29,0 g dm⁻³ sob soja, e de 40,1 g dm⁻³ para 29,8 g dm⁻³ sob floresta, indicando maior conteúdo de matéria orgânica na superfície sob vegetação nativa. Já o teor de argila aumentou com a profundidade em ambos os usos do solo, sendo de 726 g kg⁻¹ e 809 g kg⁻¹ sob soja, e de 689 g kg⁻¹ e 806 g kg⁻¹ sob floresta, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO) e teor de argila nos usos com soja e floresta

Uso do Solo	Profundidade (cm)	DMPA (mm)	Argila (g kg⁻¹)	CO (g dm⁻³)
Soja	0 – 20cm	2,6	726	31,1
Soja	20 – 35cm	2,5	809	29,0
Floresta	0 – 20cm	2,3	689	40,1
Floresta	20 – 35cm	2,5	806	29,8

Fonte: Autor (2025).

Não foi observada uma relação direta entre os agentes cimentantes e o tamanho dos agregados. O teor de CO é maior em superfície em ambos os usos, entretanto, somente no uso com soja coincide com o maior valor de DMPA, não sendo observada a mesma relação em floresta. Em relação a argila, os valores são mais elevados em subsuperfície em ambos os usos, mas somente no uso com floresta coincide com os agregados de maior diâmetro. Assim, sugere-se que a origem da agregação e da estabilidade dos agregados são diferentes entre os usos do solo.

No solo sob cultivo de soja, a formação de agregados grandes pode estar associada ao efeito do revolvimento e da compactação, em virtude do tráfego de máquinas agrícolas, que interferem na organização dos poros e na mudança da organização das partículas. Essa afirmação corrobora com os estudos de Soares et al. (2005), que indicam que as práticas mecânicas podem afetar a estrutura dos solos e promover modificações no tamanho dos agregados, reduzindo a

macroporosidade, aumentando a proporção de microporos e alterando a conectividade dos poros.

A afirmação de que os agregados grandes no solo cultivado estão ligados a esforços mecânicos, resultantes do tráfego de maquinários, é sustentada pelos resultados de densidade do solo obtidos (Tabela 4). Na área de cultivo de soja, os valores foram de $1,01 \text{ g cm}^{-3}$ na camada de 0–20 cm e de $1,15 \text{ g cm}^{-3}$ na camada de 20–35 cm, indicando valores quase duas vezes maiores do que na floresta. Neste sentido, Silva et al. (2000) afirmam que a compactação feita por maquinários pode promover o rearranjo forçado das partículas, formando torrões pela compressão, mas sem a atuação dos mecanismos naturais de estabilização, como ocorre em solos não cultivados, o que resulta em agregados com menor qualidade.

Na área de floresta, a ausência do manejo indica que os agregados foram formados por processos naturais e o DMPA elevado está ligado a atuação dos agentes cimentantes. Assim, a maior presença de matéria orgânica passa a favorecer uma estrutura mais porosa e estável, reduzindo a compactação e promovendo a formação de agregados de melhor qualidade, pois ela é o principal fator responsável pela formação e estabilidade dos agregados, atuando na coesão entre partículas e conferindo resistência à desagregação (SILVA e MIELNICZUK, 1998). Tisdall e Oades (1982) complementam, ao afirmarem que essa estabilidade resulta de ligações orgânicas de curto e longo prazo, provenientes de compostos solúveis, compostos orgânicos, resíduos vegetais e da atividade microbiana.

Por fim, embora o teor de argila contribua para a formação dos agregados, é a matéria orgânica que determina sua estabilidade. Em solos cultivados, a redução da matéria orgânica, associada a menor adição dos compostos orgânicos, ao tráfego de máquinas e ao preparo mecânico, tende a formar agregados de maior tamanho, mas com menor estabilidade estrutural, além de modificar a porosidade do solo, com redução de macroporos e aumento de microporos (SILVA; MIELNICZUK, 1998; TISDALL; OADES, 1982).

5.5. QUALIDADE DO SOLO (QS) COMO INDICADOR DA SUA FUNÇÃO E ESTRUTURA

A qualidade do solo (QS) pode ser compreendida como a capacidade do solo em exercer suas funções ecológicas e produtivas, respeitando seus limites naturais de uso; ou seja, essa definição amplia o entendimento do solo para além do fator de produção, reconhecendo-o como componente essencial da qualidade ambiental (DORAM; PARKIN, 1994, apud SILVA; CASTRO, 2015). Essa análise é complementada por Karlen et al. (1997), que afirmam que a QS está diretamente relacionada à capacidade do solo de sustentar a produtividade vegetal, manter a qualidade da água e do ar, e apoiar a saúde dos organismos vivos.

De forma geral, foi observado que o manejo agrícola alterou significativamente atributos como densidade, porosidade, estabilidade de agregados e infiltração. O aumento da densidade e a redução da porosidade e da infiltração indicam compactação e menor circulação de água e ar no solo, enquanto a menor estabilidade de agregados reflete a baixa presença de matéria orgânica, favorecendo a degradação estrutural e a erosão (DEXTER, 1988; REICHERT et al., 2007).

Nos solos cultivados com soja, a densidade foi duas vezes mais elevada do que na área mantida com floresta, principalmente na camada de 20–35 cm, indicando compactação intensa, que pode dificultar o desenvolvimento das plantas e a infiltração da água no perfil. Bronick e Lal (2005) corroboram essa informação com seus estudos, pois a compactação compromete a porosidade total e a estabilidade estrutural do solo, reduzindo sua capacidade de desempenhar funções essenciais, como o armazenamento e a condução de água.

Essa condição também é refletida nos dados de porosidade, uma vez que os solos sob vegetação nativa tiveram maior proporção de macroporos e porosidade total, enquanto os solos sob cultivo apresentaram valores inferiores, resultado direto do tráfego de máquinas e da ausência de cobertura vegetal permanente. Neste sentido, deve-se destacar que a porosidade está diretamente associada à densidade e sua redução afeta negativamente a circulação de ar, a

retenção de água e a atividade biológica (SILVA et al., 2000; TORMENA et al., 1998).

Dessa forma, atributos físicos e hídricos, como a condutividade hidráulica, são altamente sensíveis ao manejo do solo e determinam alterações nos fluxos de água, pois a baixa capacidade de infiltração nas áreas sob cultivo de soja torna o solo mais suscetível ao escoamento superficial e à erosão (SOUZA et al., 2014).

Considerando os resultados obtidos em Campo Mourão, foi observado que a estabilidade dos agregados e o teor de carbono orgânico no local de coleta corroboram as demais análises físicas, hídricas e químicas realizadas. Embora os valores médios de diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA) tenham se mantido próximos entre os diferentes usos da terra (floresta e soja), a origem e a qualidade desses agregados divergem, conforme Soares et al. (2005a) mencionam em seu estudo.

Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que, nos solos sob floresta, a presença contínua de matéria orgânica e a intensa atividade biológica favorecem a formação de agregados que são naturalmente estáveis. Já nos solos cultivados, a agregação ocorre predominantemente em função do revolvimento e da compactação mecânica, condições que reduzem a estabilidade estrutural e a retenção de carbono orgânico (SOARES et al., 2005). Bronick e Lal (2005) ainda reforçam em seus estudos que a matéria orgânica é essencial para a junção das partículas e para a manutenção da estrutura agregada do solo.

Na área de pesquisa, observa-se que, embora o plantio direto na palha (SPD) represente um avanço importante em relação ao manejo convencional, sua adoção isolada não tem sido suficiente para preservar a qualidade física e funcional do solo, pois a longo prazo, a limitação de práticas complementares podem comprometer a qualidade ambiental, favorecendo processos de degradação estrutural, aumento do escoamento superficial, assoreamento de cursos d'água e perda de carbono do solo (CORSI et al., 2012; PRUSKI, 2006).

Santos et al. (2021) obtiveram resultados semelhantes, ao analisar a conversão de vegetação natural para a monocultura de soja-algodão, no nordeste do Brasil. Embora tenha sido adotado o sistema de plantio direto nas áreas analisadas, foram observadas alterações significativas nas propriedades

físicas e hídricas dos solos, demonstrando que esse sistema de manejo não foi suficiente para minimizar a compactação dos solos e garantir as suas funcionalidades. Os resultados foram atribuídos ao tráfego intensivo dos maquinários agrícolas durante todo o processo produtivo, mesmo em sistemas considerados conservacionistas.

As consequências da conversão de áreas mantidas com vegetação natural para áreas com cultivo de soja também foram estudadas por Hunke et al. (2015), em uma bacia hidrográfica localizada no estado de Mato Grosso. Os autores mencionam reduções significativas na infiltração de água, redução da estabilidade dos agregados e aumento da concentração de fósforo e potássio nas camadas superficiais dos solos cultivados, comparado ao mantido com vegetação natural. Como consequência, ocorreu o aumento dos fluxos d'água superficiais carregando mais nutrientes para os cursos d'água, sendo obtidas altas concentrações de fosfato, nitrito e nitrato nas águas dos rios, demonstrando os impactos do uso agrícola para além da qualidade dos solos.

Diante desse cenário, destaca-se a importância da agricultura conservacionista, que requer três princípios básicos: cobertura permanente do solo por resíduos culturais, o cultivo mínimo e a diversificação de culturas (CORSI et al., 2012). A integração dessas práticas aproxima o sistema produtivo de um modelo mais sustentável, capaz de reduzir a compactação, melhorar a infiltração de água, conservar a matéria orgânica e fortalecer a estabilidade dos agregados, minimizando os impactos negativos do uso agrícola dos solos (CORSI et al., 2012).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa evidenciam que a mudança de áreas de floresta para o cultivo de soja no município de Campo Mourão – PR tem promovido impactos significativos nas propriedades físicas e hídricas do solo. As análises realizadas demonstraram maior densidade, menor macroporosidade, menor condutividade hidráulica e uma estrutura agregada menos estável nos solos cultivados, fatores que comprometem a qualidade física e funcional do solo sob soja quando comparados aos solos sob vegetação nativa.

A vegetação nativa representa um importante parâmetro de referência para avaliar a degradação ou a recuperação das propriedades do solo, uma vez que favorece a porosidade total, a infiltração de água, a estabilidade estrutural e a concentração de carbono orgânico atributos fundamentais para o abastecimento hídrico, o controle da erosão e o desenvolvimento das plantas.

Embora o diâmetro médio ponderado dos agregados tenha permanecido semelhante entre os usos, os mecanismos de formação são distintos: na floresta, os agregados resultam de processos naturais, enquanto nos solos sob soja predominam agregados decorrentes da compactação mecânica, o que os torna mais instáveis e suscetíveis à desagregação.

Dessa forma, os resultados indicam que o manejo agrícola sem práticas conservacionistas adequadas promove uma degradação constante e progressiva da estrutura do solo. Neste sentido, é fundamental adotar estratégias que conciliem produção e conservação, como a aplicação sistemática das ações do manejo conservacionista, que incluem a manutenção do plantio direto na palha, o controle do tráfego de máquinas, a rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura.

Por fim, este estudo reforça a importância do monitoramento contínuo dos atributos físicos e hídricos como ferramenta para a gestão ambiental e o planejamento sustentável do uso da terra, sobretudo em áreas de elevada aptidão agrícola, como os Latossolos da região de Campo Mourão – PR.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013.
- AMBROSANO, J. E.; CARLOS, D. A. J.; FILHO, L. F. O.; ROSSI, F.; WUTKE, B. E. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil Fundamentos e Prática**. v. 1. ed. 2. Embrapa. 2023
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1945–1962, 2004.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 415–422, 2004.
- ASSIS, L. R.; LANÇAS, P. K. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 515–522, 2005
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. E.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 309–316, 2015.
- BARAJAS, C. E.; BERNAL, A. D.; RODRIGUEZ, N. L. M.; RIVERA, B. I. H.; VAZQUEZ, G. P. F. Analyzing the impact of intensive agriculture on soil quality: A systematic review and global meta-analysis of quality indexes. **Journal Agronomy**. v.13, p. 1-21, 2023
- BERTOL, I.; ANDRADE, A. P.; MAFRA, A. L.; BALDO, G. R.; DELA PICCOLLA, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Physical properties of a Humic Cambisol under tillage and cropping systems after 12 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 219–226, 2010
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.843-849, 2005.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; SOUZA, Z.M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, Botucatu, v.8, n.3, p.242-249, 2003.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 167 – 177, 2001.

BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Paraná. **Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral**, Curitiba: SGB-CPRM, 2021.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. **Critical Reviews in Plant Sciences**, 23(6), 481–504. 2004.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. W. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil & Tillage Research**, v. 198, p. 104534, 2020.

BORGES, S. C.; CABRAL, A. D.; RIBEIRO, T. B.; WENDLING, B. Agregação do solo, carbono orgânico e emissão de CO₂ em áreas sob diferentes usos no Cerrado, região do Triângulo Mineiro. **Ambiente & Água – Na Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v.10. n.3. 2015.

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

CABEDA, V. S. M.; SILVA, N. J. A. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.30, 2006.

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, v. 22, n. 3, p. 527–538, 1998.

CENTURION, F. J.; DUARTE, P. A.; FREDDI, S. O.; LEONEL, L. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I – Características de planta, solo e índices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2009.

CORRADINI, C.; DARI, J.; FLAMMINI, A.; GOVINDARAJU, R. S.; MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C. **Modelagem de infiltração de chuva: uma revisão**. Water, Basel, v. 10, n. 12, p. 1873, 2018.

CORRECHEL, V. **Densidade do solo: influência da posição relativa à linha de plantio em dois sistemas de preparo do solo**. 1998. 53 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

CORSI, S.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; PISANTE, M.; SÀ, J. de M. **Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from Conservation Agriculture: a literature review**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

CRUZ, M. L. **Agricultura familiar no contexto da lavoura capitalista no município de Campo Mourão - PR. 2010**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – PGE/UEM, Maringá.

DANIEL, O.; MERCANTE, M. F.; VITORINO, T. C. A.; PEZARICO, R. C. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias. Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**. v. 56. n. 1, p. 40-47, jan./mar. 2023.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Revista Geoderma**, v.120, p. 201-214, 2004.

DEXTER, A.R. Advances in Characterization of Soil Structure. **Soil & Tillage Research**, v. 11, p. 199 – 238, 1988.

DUTRA, C. A.; GIAROLA, B. F. N.; TORMENA, A. C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.31. 2007

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 725–734, 2013.

GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. **Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo**. Irriga, Botucatu, v. 17, n. 3, p. 337–345, 2012.

GYSSSELS, G.; POESEN, J.; BOCHET, E.; LI, Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 29, p. 189–217, 2005.

HORN, R.; WAY, T. R.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil & Tillage Research**, 36(1–2), 239–260. 2003.

HUNKE, P.; ROLLER, R.; ZEILHOFER, P.; SCHRÖDER, B.; MUELLER, E. N. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 31–43, 2015.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Contribuições das pesquisas agrometeorológicas do IAPAR**. Londrina: IAPAR, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censos Demográficos**. Rio de Janeiro: IBGE, 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010. Acesso em março/2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo demográfico 2022: resultados preliminares – população e território**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – IPARDES. **Produto Interno Bruto dos Municípios do Paraná – Campo Mourão: série histórica do Valor Adicionado Bruto (2010–2021)**. Curitiba: IPARDES, 2025.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Intemperismo de rochas e minerais. Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 171-206.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, J. M.; DORAN, W. J.; CLINE, G. R.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, E. G. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 4–10, 1997.

MACHADO, L. O. A. P. **Compactação do Solo e Crescimento de Plantas Como Identificar, Evitar e Remediar**. Embrapa. Documentos 56. Rio de Janeiro. 2003.

MARCATTO, F.S.; SILVEIRA, H. Relação entre as propriedades físico-hídricas dos solos e os tipos de uso da terra como subsídio ao manejo e conservação do solo e da água na bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n.06, 2016.

MARCATTO, F. S.; SILVEIRA, H.; FONTANA, A. C. Estabilidade de agregados dos solos em uma topossequência cultivada com cana-de-açúcar em Astorga-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 7, p. 3953–3967, 2021.

MARCOTTI, Angelo Ricardo. MARCOTTI, Tais Cristina Berbet. **Caracterização da evolução do espaço urbano de Campo Mourão**, 2011.

MARIOTI, J.; BERTOL, I.; RAMOS, J.C.; WERNER, R.S.; PADILHA, J.; BANDEIRA, D.H. Erosão hídrica em semeadura direta de milho e soja nas direções do pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo e descoberto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 1361-1371, 2013.

MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O. F.; MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 193–206, 2008.

MARTINS, Romário. **História do Paraná**. Curitiba: Guairá. 1953.

MINEIROPAR. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000**. Curitiba: Minerais do Paraná – MINEROPAR; Universidade Federal do Paraná, 2006.

OLIVEIRA, R. C.; MOURA, E. G.; SCHWERTZ, D. Impactos do uso do solo em atributos físicos de um Latossolo Amarelo da região de Igarapé-Açu, nordeste do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 55, n. 2, p. 147–153, 2012.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, 79(2), 131–143. 2004.

PROCÓPIO, E. F. **Campo Mourão: a participação dos migrantes sulistas na produção da soja a partir dos anos 1960**. PDE – Programa de Desenvolvimento Educacional. UEM (Universidade Estadual de Maringá). 2008

PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Ed. UFV, 2006, 240 p.

PUIGDEFÁBREGAS, J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, p. 133–147, 2005.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31(4), 861–879. 2007.

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

RESCK, S. V. D. A conservação da Água Via Terraceamento em Sistema de Plantio Direto e Convencional no Cerrado. **Circular Técnica 22**. Embrapa Cerrados. 2002.

RODERJAN, C.V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y.S.; HATSCHBACH, G.G. As unidades fitogeográficas do estado do Paraná, Brasil. **Revista Ciência e Ambiente**, n. 24, v.1, 2002.

ROSSETTI, K.V.; CENTURION, J.F.; OLIVEIRA, P.R. de; ANDRIOLI, I. Atributos Físicos nos Tempos de Adoção de Manejos em Latossolo Cultivado com Soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.367-376, 2012.

SANTOS, R. S.; WIESMEIER, M.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; LOCATELLI, J. L.; HOLZSCHUH, M.; CERRI, C. E. P. Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: a soil physical health assessment. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150515, 2021.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. **Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar**. Mercator, Fortaleza, v. 14, n. 3, p. 169–185, set./dez. 2015.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 579-585, 2006.

SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; CORSI, A. C. **Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade**. Instituto Agrônomo de Campinas. 2006.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 311–317, 1998.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. **Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo**. Ci. Rural, 30:795-801, 2000.

SILVA N. L. F.; SANTOS, G. R.; SOUSA, M. F.; FERREIRA, E. M. B.; ARAÚJO, E. N. Atributos físicos do solo e produtividade da pastagem em sistema de manejo de integração Lavoura-Pecuária-Floresta. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 10, p. 95-104, 2020.

SIMIONATO, E. **Campo Mourão: sua gente. sua história**. Campo Mourão: Gráfica e Editora Bacon, 1999.

SOARES, J. L. N.; ESPÍNDOLA, C. R.O; CASTRO, S. S. de. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 29. p. 1005-1014, 2005 (a).

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido à subsolagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 4, p. 606-613, 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573 p.m. 2025

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22(4), 573–581. 1998.

THOMAZ, L. E.; JUNIOR, A. F. C.; MELO, R. T.; VENDRAME, S. R. P. Mechanisms of aggregate breakdown in (sub) tropical soils: Effects of the hierarchical resistance. **Catena Cientific Journal**. 2022.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.; NEVES, L. J. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 435-442, 2005.

YOKOO, Edson Noriyuki. Terra de negócio: estudo da colonização no Oeste Paranaense. **Encontro de Produção Científica e Tecnológica**. EPCT, 2009.

YOUKER, R. E.; McGUINNESS, J. L. A short method of obtaining mean weight diameter values of aggregate analyses of soils. **Soil Science**, v. 83, n. 4, p. 291–294, 1956.