



Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Programa Interunidades



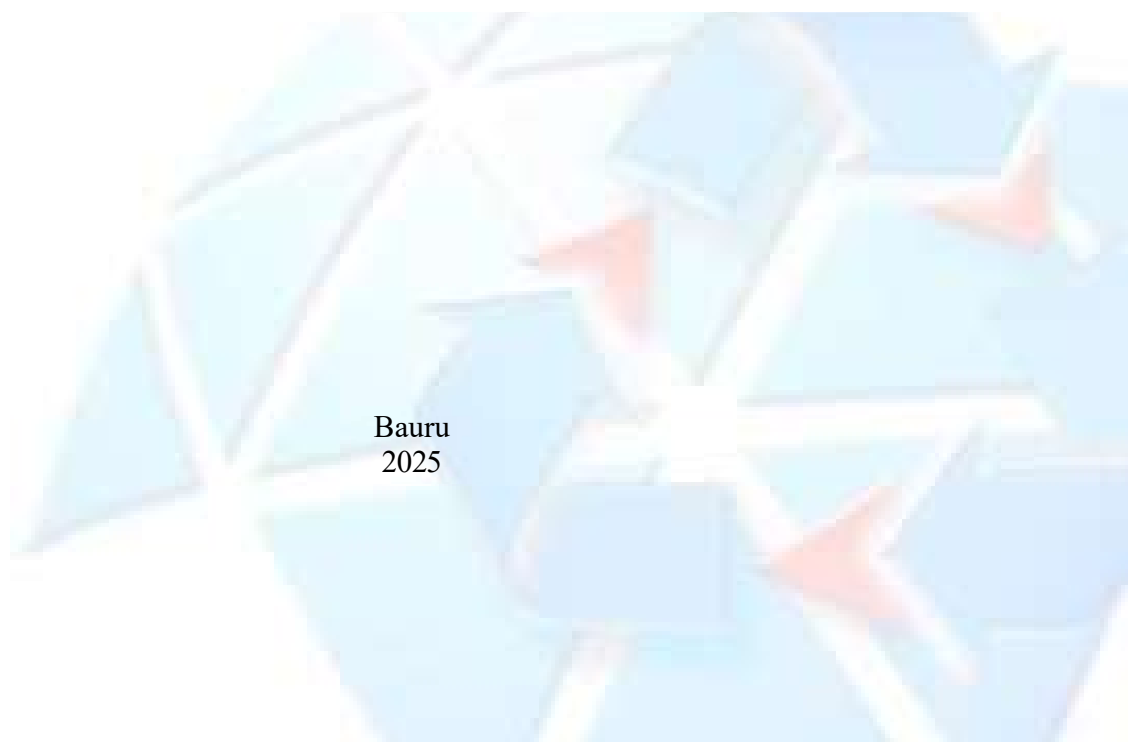
Doutorado

Engenharia Civil e Ambiental

SANDRA MAUREN ELL

**INVESTIGAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DOS SOLOS ÀS AVARIAS, BASEADA
EM PARÂMETROS HIDROMECÂNICOS E ECOLÓGICOS: ESTUDO DE CASO
DE SOROCABA (SP)**

Bauru
2025



Sandra Mauren Ell

**INVESTIGAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DOS SOLOS ÀS AVARIAS, BASEADA EM
PARÂMETROS HIDROMECÂNICOS E ECOLÓGICOS: ESTUDO DE CASO DE
SOROCABA (SP)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental. Área de Concentração: Geotecnia.

Orientador: Professor Titular Alexandre Marco da Silva.

Bauru
2025



E44i

Ell, Sandra Mauren

Investigação da suscetibilidade dos solos às avarias, baseada em parâmetros hidromecânicos e ecológicos: estudo de caso de Sorocaba (SP) / Sandra Mauren Ell. -- Bauru, 2025

127 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Alexandre Marco da Silva

1. Caracterização geotécnica. 2. Propriedades do solo. 3. Eco-hidrologia dos solos. 4. Cartografia de solos. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE SANDRA MAUREN ELL, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 de dezembro de 2025, às 8h30min, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de SANDRA MAUREN ELL, intitulada **INVESTIGAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DOS SOLOS ÀS AVARIAS, BASEADA EM PARÂMETROS HIDROMECAÑICOS E ECOLÓGICOS: ESTUDO DE CASO DE SOROCABA (SP)**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ALEXANDRE MARCO DA SILVA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS, Prof. Dr. WILLIAM DANTAS VICHETE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS, Profª. Drª. VALQUIRIA DE CAMPOS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS, Prof. Dr. JOSÉ MAURO SANTANA DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba / Sorocaba/SP, Profª. Drª. THAÍS GUARDA PRADO AVANCINI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia / Centro Universitário FACENS, Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ALEXANDRE MARCO DA SILVA

Para meu esposo, Salvador, e meu filho, Giovanni, fontes de força e inspiração em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar, fortalecer e renovar minha fé nos momentos de dificuldade, permitindo-me alcançar mais esta conquista.

Ao meu esposo, Salvador Afonso, companheiro de todas as horas, por seu apoio constante, compreensão nos momentos de ausência e palavras de encorajamento. Sua paciência e amor me deram forças para seguir em frente.

Ao meu filho, Giovanni Bruno, minha luz, minha maior conquista e a mais profunda expressão do amor que habita em mim. Fonte diária de inspiração, força e superação, você é a razão de todos os meus esforços e a motivação constante para ser melhor a cada dia. Tudo o que sou e tudo o que busco construir encontra sentido em você.

Aos meus pais, Egon e Gilka, pela base sólida de amor, educação e valores que sempre me proporcionaram. Vocês me ensinaram a importância do esforço, da perseverança e da integridade, estando ao meu lado em cada etapa dessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Titular Alexandre Marco da Silva, pela dedicação, paciência e valiosas orientações, conduzindo a pesquisa com conhecimento, humildade e sensibilidade humana. Sua confiança e incentivo foram essenciais para a realização deste trabalho.

À Suzan da Silva Lessa, técnica do Laboratório de Águas e Solos do ICT de Sorocaba – UNESP, pelo suporte técnico e pela competência que contribuíram decisivamente para o sucesso dos experimentos.

À minha cunhada, Paoline Tagliaferro de Oliveira, pelo auxílio inestimável nos experimentos de laboratório. Sua ajuda foi essencial nos momentos mais desafiadores, e sua generosidade e parceria tornaram esse caminho mais leve.

Ao meu colega, Lucas Hubacek Tsuchiya, pela colaboração, troca de ideias e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua amizade e disposição em contribuir foram muito valiosas.

Aos meus alunos da Engenharia Civil da UNIP, Deivide Casagrande, Walmir Antônio Dias, Rodrigo Santiago e Diego, pela participação e pelo auxílio prático nos experimentos. O comprometimento e a ajuda de vocês foram fundamentais para o avanço da pesquisa.

A todos vocês, minha mais profunda e eterna gratidão. Sem o apoio, a colaboração e o incentivo de cada um, este trabalho não teria se concretizado. Muito obrigada por acreditarem e caminharem ao meu lado nessa jornada.

“Não deixes que termine sem teres crescido um pouco.
Sem teres sido feliz, sem teres alimentado teus sonhos.
Não te deixes vencer pelo desalento.
Não permitas que alguém te negue o direito de expressar-te,
que é quase um dever.”

Walt Whitman

Título: Investigação da suscetibilidade dos solos às avarias, baseada em parâmetros hidromecânicos e ecológicos: estudo de caso de Sorocaba (SP).

Candidata: Engenheira MSc Sandra Mauren Ell.

Orientador: Professor Associado Alexandre Marco da Silva.

RESUMO – O solo é um material naturalmente heterogêneo, cujo comportamento físico e estrutural depende de sua constituição e de fatores externos como a ação da água, cobertura vegetal e interferência humana. Em Sorocaba (SP), o avanço urbano e industrial tem causado mudanças expressivas no meio físico, afetando a estabilidade superficial e a dinâmica hidrológica dos solos. Diante disso, esta tese adotou uma abordagem integrada para proposição de uma caracterização eco-hidro-geotécnica, com o objetivo de avaliar a suscetibilidade dos solos urbanos à erosão, instabilidade e degradação. Foram analisados 65 pontos amostrais distribuídos pelo município, com a coleta de dados físicos (granulometria, consistência, densidade), hidrológicos (umidade, erodibilidade) e ecológicos (carbono orgânico total), além do uso de bases geoespaciais preexistentes, como modelo digital de elevação, mapa pedológico e cobertura do uso do solo. Os dados foram processados com ferramentas estatísticas, análise espacial e funções de pedotransferência. Os resultados revelaram predominância de solos arenosos, com texturas areia e areia franca, e alta variabilidade nos horizontes superficial e subsuperficial. A associação dos dados com a cobertura do entorno permitiu localizar zonas críticas de instabilidade, associadas à ausência de vegetação, compactação superficial e altos teores de silte, este último correlacionado significativamente com o índice de erodibilidade K_{EPIC} . Com base nos experimentos realizados, foi possível propor e validar um modelo estatístico entre silte e K_{EPIC} , contribuindo para o aprimoramento de funções de pedotransferência em solos de baixa coesão. Os produtos, incluindo mapas e tabelas, oferecem subsídios relevantes para o planejamento urbano e para práticas sustentáveis na Engenharia Civil e Ambiental. A metodologia adotada, por sua vez, representa uma inovação ao integrar atributos ecológicos e geotécnicos, podendo ser replicada em outros contextos urbanos em transformação.

Palavras-chave: caracterização geotécnica, propriedades do solo, eco-hidrologia dos solos, cartografia de solos.

Title: Investigation of soil susceptibility to damage, based on hydromechanical and ecological parameters: case study of Sorocaba (SP).

Candidate: Engineer MSc Sandra Mauren Ell.

Advisor: Associate Professor Alexandre Marco da Silva.

ABSTRACT – The soil is a naturally heterogeneous material, whose physical and structural behavior depends on its composition and on external factors such as water action, vegetation cover, and human interference. In Sorocaba (SP), urban and industrial expansion has caused significant changes in the physical environment, affecting superficial stability and the hydrological dynamics of soils. In this context, this thesis adopted an integrated approach to propose an eco-hydro-geotechnical characterization. A total of 65 sampling points distributed throughout the municipality were analyzed, including physical (particle size distribution, consistency, density), hydrological (moisture content, erodibility), and ecological data (total organic carbon), along with the use of preexisting geospatial datasets such as digital elevation models, pedological maps, and land use cover. The data were processed using statistical tools, spatial analysis, and pedotransfer functions. The results revealed a predominance of sandy soils, with sand and loamy sand textures, and high variability in both surface and subsurface horizons. The cross-analysis with surrounding land cover allowed the identification of critical instability zones, associated with the absence of vegetation, surface compaction, and high silt content, the latter significantly correlated with the K_{EPIC} erodibility index. Based on the experiments conducted, it was possible to propose and validate a statistical model relating silt content to K_{EPIC} , contributing to the improvement of pedotransfer functions in low-cohesion soils. The products, including maps and tables, provide valuable support for urban planning and sustainable practices in Civil and Environmental Engineering. The adopted methodology represents an innovation by integrating ecological and geotechnical attributes, and it can be replicated in other transforming urban contexts.

Keywords: geotechnical characterization, soil properties, soil eco-hydrology, soil cartography.

Lista de Figuras

Figura 5.1. Localização da área de estudo. Município de Sorocaba, estado de São Paulo.....	43
Figura 5.2. Utilização de perfuratriz motorizada para coleta de solo superficial em área de vegetação nativa.....	45
Figura 5.3. Ilustração de exposição de perfil de solo com feições indicativas de erosão laminar e escorregamento superficial.....	47
Figura 5.4. Agitador mecânico utilizado no preparo das amostras para o Ensaio de Sedimentação.....	53
Figura 5.5. Análise granulométrica por sedimentação em provetas graduadas.....	54
Figura 5.6. Triângulo textural utilizado para identificar as classes texturais do solo.....	55
Figura 6.1. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte superficial. a) Areia total, b) Silte, c) Argila; d) Classificação Textural.....	76
Figura 6.2. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte subsuperficial. a) Areia total, b) Silte, c) Argila; d) Classificação Textural.....	77
Figura 6.3. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte superficial (Mapa gerado por IDW). a) Areia grossa e média, b) Areia fina, c) Silte; d) Argila.....	79
Figura 6.4. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte subsuperficial (Mapa gerado por IDW). a) Areia grossa e média, b) Areia fina, c) Silte; d) Argila.....	81
Figura 6.5. Porcentagens dos Limites de Consistência do solo para o horizonte superficial (Mapa gerado por IDW). a) Limite de plasticidade, b) Limite de liquidez, c) Índice de plasticidade.....	83
Figura 6.6. Porcentagens dos Limites de Consistência do solo para o horizonte subsuperficial (Mapa gerado por IDW). a) Limite de plasticidade, b) Limite de liquidez, c) Índice de plasticidade.....	85
Figura 6.7. Mapa da distribuição espacial do Carbono Orgânico Total (COT) no horizonte superficial, no município de Sorocaba (SP) (interpolado por IDW).....	86
Figura 6.8. Mapa da distribuição espacial da Erodibilidade do solo no horizonte superficial, expressa pelo índice K_{EPIC} , no município de Sorocaba (SP) (interpolado por IDW).....	87
Figura 6.9. Relação entre o percentual de silte e o índice de erodibilidade do solo (K_{EPIC}), no horizonte superficial, no município de Sorocaba (SP).....	88

Lista de Gráficos

Gráfico 6.1. Distribuição das amostras de Solos Superficial e Subsuperficial com base na Análise Discriminante Multivariada (ADM) da Densidade do solo e das Porcentagens de Areia Grossa e Média, Areia Fina, Silte, Argila. Na figura os triângulos correspondem às amostras coletadas no horizonte superficial e os círculos correspondem às amostras coletadas no horizonte subsuperficial.....	70
Gráfico 6.2. Relação entre o percentual de Silte e a Erodibilidade do solo (K_{EPIC}) no Horizonte Superficial obtida pela Regressão Linear.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 4.1. Classificação dos solos em função do IP, segundo Jenkins (CAPUTO; CAPUTO, 2016).....	27
Tabela 5.1. Indicadores de erosão e sua descrição, segundo Okoba e Sterk (2006).....	48
Tabela 5.2. Tempo necessário, a diferentes temperaturas; para sedimentação de partículas de solo com peso específico de 2,65. Para a argila ($d < 0,002\text{mm}$), considerou-se uma profundidade de 5 cm e para a argila+silt ($< 0,02\text{mm}$) de 10 cm (¹).....	54
Tabela 6.1. Resultados estatísticos da análise granulométrica para o horizonte superficial.....	68
Tabela 6.2. Resultados estatísticos da análise granulométrica para o horizonte subsuperficial.....	68
Tabela 6.3. Parâmetros Estatísticos das relações entre propriedades Texturais, Índices de Consistência (LL e LP), Carbono Orgânico Total (COT) e Erodibilidade (K_{EPIC}), para o solo do horizonte superficial.....	73
Tabela 6.4. Parâmetros Estatísticos das relações entre propriedades Texturais e Índices de Consistência (LL e LP), para o solo do horizonte subsuperficial.....	74
Tabela 6.5. Gradiente textural, relação entre a média aritmética da porcentagem do tipo de solo do horizonte subsuperficial e a média aritmética da porcentagem do tipo de solo do horizonte superficial.....	74
Tabela A.1. Coordenadas x e y dos pontos coletados, cobertura do entorno (CE), observações, indicadores de erosão e valores de resistência do solo, obtidos com o penetrômetro.....	119
Tabela A.2. Parâmetros físicos, mecânicos e geotécnicos para o horizonte superficial.....	123
Tabela A.3. Parâmetros físicos, mecânicos e geotécnicos para o horizonte subsuperficial.....	125
Tabela A.4. Parâmetros hidrológicos e ecológicos para o horizonte superficial.....	127

Lista de Quadros

Quadro 5.1. Correlações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas no grupo Solo Superficial.....	61
Quadro 5.2. Correlações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas no grupo Solo Subsuperficial.....	62
Quadro 5.3. Relações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas do grupo Solo Superficial analisadas por regressão.....	64
Quadro 5.4. Relações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas do grupo Solo Subsuperficial analisadas por regressão.....	64

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	18
2.1. HIPÓTESE.....	18
2.2. OBJETIVOS.	18
2.2.1. Objetivo Geral.	18
2.2.2. Objetivos Específicos.	18
3. JUSTIFICATIVA.....	20
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1. Solos – conceito.	21
4.2. Propriedades físicas, mecânicas e geotécnicas.	22
4.3. Propriedades hidrológicas e ecológicas.....	27
4.3.1. Vulnerabilidade Ambiental.	27
4.3.2. Erosão.....	28
4.3.3. Carbono orgânico total do solo (COT).....	29
4.3.4. Erodibilidade do solo.	31
4.3.5. Gradiente Textural – Variação da Textura do Solo entre Horizontes.	32
4.4. Modelos Estatísticos de caracterização geotécnica, hidrológica e ecológica do solo. .	33
4.4.1. Modelagem estatística: Funções de Pedotransferência (FPTs).	36
4.5. Modelagem Cartográfica de Caracterização do solo.	39
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
5.1. Área de Estudo: Localização.	42
5.2. Procedimentos de campo.	44
5.2.1. Determinação dos Pontos de Amostragem e Coordenadas x e y.	44
5.2.2. Obtenção das Amostras de solo.	44
5.2.3. Determinação da Cobertura do Entorno.	45
5.2.4. Determinação dos Indicadores de Erosão.	46
5.2.5. Determinação da Profundidade de Penetração do Penetrômetro.	49
5.3. Análises Laboratoriais Geotécnicas.	49

5.3.1.	Determinação da Densidade do solo.	49
5.3.2.	Determinação da Cor do solo.	50
5.3.3.	Determinação do Teor de Umidade do solo.	51
5.3.4.	Determinação da Granulometria do solo.	51
5.3.4.1.	Preparo da Amostra de solo.	52
5.3.4.2.	Ensaio de Peneiramento.	52
5.3.4.3.	Ensaio de Sedimentação.	52
5.3.5.	Limites de Consistência do solo.	55
5.4.	Análises Laboratoriais Eco-Hidrológicas.	57
5.4.1.	Determinação do Carbono Orgânico Total do solo.	57
5.4.2.	Determinação do Índice de Erodibilidade do solo.	58
5.5.	Modelos Estatísticos de Caracterização Geotécnica e Eco-Hidrológica do solo.	59
5.5.1.	Estatística descritiva da granulometria do solo.	59
5.5.2.	Análise inferencial: Teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952).	60
5.5.3.	Coeficiente de Correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904).	61
5.5.4.	Análise Discriminante Multivariada (ADM).	62
5.5.5.	Regressões – Funções de Pedotransferência (FPTs).	63
5.5.6.	Gradiente Textural – Variação da Textura do Solo entre Horizontes.	65
5.6.	Modelagem Cartográfica de Caracterização do solo.	65
6.	RESULTADOS.	67
6.1.	Caracterização Inicial: Observações de Campo e Parâmetros de Laboratório.	67
6.2.	Modelos Estatísticos de caracterização geotécnica, hidrológica e ecológica do solo. .	68
6.3.	Mapeamento Geoespacial das Propriedades do Solo.	75
6.4.	Caracterização Eco-hidrológica dos Solos com base em Análises Laboratoriais.	89
7.	DISCUSSÃO.	90
7.1.	Análise integrada das coordenadas geográficas e da cobertura do entorno.	90
7.2.	Indicadores de erosão e condições ambientais associadas.	91
7.3.	Resistência do solo (Penetrômetro).	92
7.4.	Conexão entre cobertura do entorno, estabilidade e vulnerabilidade do solo.	93
7.5.	Relação entre a granulometria do solo e a estabilidade superficial.	94
7.6.	Variações verticais nos atributos físicos do solo com base no teste de Kruskal-Wallis...	95

7.7. Diferenciação entre horizontes com base na Análise Discriminante Multivariada (ADM).....	96
7.8. Aplicabilidade de funções de pedotransferência com base em correlação e regressão.	97
7.9. Interpretação do gradiente textural entre horizontes do solo.	99
7.10. Interpretação geoespacial das propriedades físicas do solo.	100
7.11. Relação entre carbono orgânico total (COT) e erodibilidade do solo (K_{EPIC}).	103
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.	105
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	107
APÊNDICE A	119

1. INTRODUÇÃO.

O solo constitui um elemento de suma importância tanto na Engenharia Civil quanto na Engenharia Ambiental, sendo um fator primordial em todas as etapas de projeto, construção e manutenção de infraestruturas urbanas, além de estar diretamente relacionado ao uso e ao consumo de recursos naturais. Nesse contexto, o estudo dos solos no município de Sorocaba assume relevância estratégica, uma vez que influencia diretamente a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento urbano. Localizado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, o município possui uma área total de 456,0 km², dos quais 349,2 km² correspondem ao perímetro urbano e 106,8 km² à área rural. As coordenadas geográficas de sua sede são 23°30'22" de latitude Sul e 47°27'21" de longitude Oeste de Greenwich (MACHADO-HESS, 2020).

Com uma população estimada em 723.682 habitantes (IBGE, 2022b), Sorocaba apresenta intensos e acelerados processos de desenvolvimento econômico e expansão urbana, frequentemente conduzidos de forma pouco ordenada, os quais tendem a modificar as propriedades físicas dos solos e as condições ambientais, impondo desafios crescentes à sua conservação.

A urbanização desorganizada e a impermeabilidade do solo constituem a dinâmica hidrogeológica da região e revigoram problemas inerentes, como inundações (PEREIRA et al., 2021). A necessidade de compreender a interferência das mudanças no comportamento do solo deu origem ao estabelecimento de estudos eco-hidro-geotécnicos na região. Tais estudos são voltados para descrever as características físicas, químicas e biológicas dos solos na localidade, para abordar a sustentabilidade de forma multifacetada para o uso da terra.

A caracterização geotécnica fornece informações detalhadas sobre a constituição, estrutura e propriedades dos solos sob várias condições. Essas propriedades desempenham um papel fundamental no planejamento de infraestruturas, como prédios, sistemas de escoamento, estradas e outras obras (SOUZA et al., 2023). Além disso, a interação entre esses fatores influencia diretamente processos como a infiltração de água, a retenção de nutrientes e o suporte à biodiversidade, afetando tanto as características geotécnicas quanto ecológicas dos solos.

A Eco-hidrologia interage com a regulação do ciclo hidrológico, mantendo os ecossistemas por meio do estudo básico das interações entre solo, água e processos biológicos. Novos resultados destacam as funções dos ecossistemas naturais na mitigação de inundações, retenção de água e

recarga de aquíferos. A qualidade local de rios e córregos também apresenta dependência direta das propriedades do solo e seu gerenciamento integrado de recursos (PEREIRA et al., 2021).

De acordo com Simionatto et al. (2024), o mapeamento do solo é um dos núcleos do gerenciamento sustentável da terra, onde eles se concentram nas evoluções do mapeamento do solo, por meio de tecnologias como sensoriamento remoto e SIG. Esses mapas feitos fornecem precisão em informações espaciais para atributos do solo com significância para áreas de urbanização, sustentabilidade na agricultura e biodiversidade no planejamento de conservação.

Portanto, a necessidade deste estudo é tentar aplicar uma abordagem multidisciplinar à análise do solo, considerando aspectos hidromecânicos e ecológicos. Por meio desses escopos de análise, será alcançada uma identificação robusta de características dominantes que influenciam o comportamento do solo sob condições variáveis do ambiente e uso, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável.

O objetivo foi analisar a vulnerabilidade dos solos de Sorocaba a danos, contribuindo para fomentar um amplo debate sobre a relevância do manejo da Terra integrando ciência e sustentabilidade. As aplicações práticas resultantes disso podem auxiliar na recuperação de áreas degradadas, na amenização dos malefícios da urbanização irracional e no fomento de políticas públicas mais eficientes. Espera-se, portanto, auxiliar a situar o papel dos solos na sustentação dos ecossistemas e da vida humana em uma perspectiva holística e integrada.

2. HIPÓTESE E OBJETIVOS.

2.1. HIPÓTESE.

Parte-se da premissa de que solos subsuperficiais são mais susceptíveis a processos de deformação e erosão, em relação a fração superficial e que, quando expostos e submetidos a pressões relacionadas a processos abrasivos, climáticos e atividades de construção civil (terraplanagem, recortes, instalação de fundações, instalação de estradas), tem o problema da estabilidade ampliado.

2.2. OBJETIVOS.

2.2.1. Objetivo Geral.

Investigar a suscetibilidade dos solos ocorrentes no município de Sorocaba (SP) a avarias, com base na análise integrada de parâmetros hidromecânicos e ecológicos, visando identificar fatores críticos de instabilidade e contribuir para o aprimoramento de modelos de diagnóstico em contextos urbanos em transformação.

2.2.2. Objetivos Específicos.

Os objetivos específicos têm como propósito fornecer subsídios para confirmar ou refutar a hipótese proposta, além de gerar resultados que possam contribuir de forma significativa para as diversas áreas da Engenharia Civil e Ambiental. Eles são:

- Coletar as amostras e determinar, em laboratório, os parâmetros físicos, mecânicos e geotécnicos – densidade, cor, teor de umidade, granulometria e consistência, e os parâmetros eco-hidrológicos – carbono orgânico total e erodibilidade do solo;
- Analisar estatisticamente os parâmetros geotécnicos e eco-hidrológicos dos solos superficial e subsuperficial;

- Prospectar e validar algoritmos de interpolação capazes de gerar mapas precisos sobre fatores ou elementos de determinação complexa utilizando-se dados de obtenção mais simples;
- Desenvolver mapas da região de Sorocaba e integrar estes mapas com outros já disponíveis (modelo de elevação digital, mapa de solos e mapa de cobertura da terra).

3. JUSTIFICATIVA.

Processos de alteração da cobertura da terra, com destaque para a urbanização, intensificaram-se com o aumento das atividades industriais, fato que ocorre, constantemente, na região de Sorocaba. Dessa maneira, inúmeras pessoas são atraídas para a cidade. Esse fenômeno provoca mudanças drásticas na natureza, desencadeando diversos problemas ambientais, tais como: poluição, desmatamento, redução da biodiversidade, mudanças climáticas, produção de lixo e de esgoto, entre outros.

Essa grande intervenção humana impõe um conjunto de severas pressões ao meio físico, a saber: supressão da vegetação original; desequilíbrios geotécnicos impostos por atividades, tais como, escavações, cortes, aterros e obras subterrâneas (incluindo viadutos); sobrecargas por aterramentos e fundações concentradas e difusas; alteração dos processos hidrológicos locais devido à impermeabilização, com aumento do escoamento superficial e redução da infiltração de águas pluviais; expressiva alteração do traçado do sistema de drenagem superficial; exposição de solos aos processos erosivos; disposição de resíduos sólidos das mais diversas naturezas; lançamento de resíduos (efluentes) industriais; alterações climáticas locais; dentre outras pressões (FILIZOLA et al., 2011; OLIVEIRA; SALLES, 2020).

Em função da escassez de informações e do município de Sorocaba estar em constantes mudanças ambientais, notadamente, pelo processo de urbanização desordenado, torna-se necessário um estudo eco-hidro-geotécnico do solo dessa região, para que possa ser verificado o quanto já foi alterado.

A principal inovação proposta pelo estudo é o embasamento científico na caracterização desse solo quanto às suas propriedades, composição e relação água-solo. Os resultados, obtidos a partir das respostas do comportamento do solo, poderão ser utilizados para a determinação da erodibilidade do solo de Sorocaba.

Os estudos referentes à caracterização hidro-geotécnica do solo do município de Sorocaba ainda são incipientes, logo o desenvolvimento de um método de integração, entre os resultados a serem obtidos, será de extrema valia.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

4.1. Solos – conceito.

O solo é um material constituído de cinco componentes: elementos minerais, matéria orgânica, organismos vivos, gases e água. Os minerais do solo são divididos em três classes de tamanho: argila, silte e areia. As porcentagens de partículas nessas classes de tamanho são chamadas de textura do solo. A mineralogia dos solos é diversa, sendo o quartzo o de ocorrência mais comum. A matéria orgânica do solo é composta por resíduos vegetais, animais e microbianos em vários estados de decomposição. As cores do solo variam de marrons, amarelos, vermelhos, cinzas, brancos e pretos comuns até cores de solo raras, como verdes e azuis (NEEDELMAN, 2013).

É vista como sendo a interface central da zona crítica da Terra, a camada da superfície planetária que se estende desde a rocha inalterada até a copa da vegetação e está sob intensa pressão da demanda humana por biomassa, água e recursos alimentares. Várias das funções do solo se manifestam durante o intemperismo do leito rochoso e, em perfis de solo, totalmente, desenvolvidos, há a relação entre a arquitetura de sua estrutura, havendo o desenvolvimento de agregados do solo como unidades ecológicas fundamentais (BANWART et al., 2019). As funções do solo incluem produção de biomassa para alimentos, combustível, fibra e madeira; armazenamento de carbono, derivado da matéria orgânica que é, biologicamente, fixada do dióxido de carbono atmosférico; e a transformação em massa de nutrientes e seu armazenamento disponível para as plantas.

Funções adicionais do solo incluem armazenamento, filtragem e percolação de água, calor e gases para mitigar inundações e abastecimento de água disponível nas plantas, atenua as cargas de poluição. Também transmite a água para aquíferos e riachos, viabiliza a troca de gases com a atmosfera e fornece massa térmica para armazenamento de energia. Dentre as funções, há, também, a manutenção da biodiversidade terrestre de habitat, espécies e genes, fornecendo um suporte físico para estruturas construídas e uma paisagem cultural para atividades humanas, saúde e bem-estar; além de atuar como fonte de matérias-primas, incluindo recursos biológicos, como antibióticos; e fornecer um arquivo do patrimônio geológico e arqueológico (BLUM, 2005; BANWART et al., 2019).

Os solos são amplamente utilizados como materiais de construção ou como base para estruturas de engenharia. As propriedades e a estrutura do solo têm uma influência significativa no design e na resistência de qualquer fundação e da estrutura que ela suporta. Utilizando essas informações, a equipe de projeto pode calcular a capacidade de carga e as pressões de suporte, essenciais para a decisão final sobre as cargas que podem ser devidamente suportadas (ROY; BHALLA, 2017).

4.2. Propriedades físicas, mecânicas e geotécnicas.

A distribuição dos solos na natureza varia significativamente de um local para outro. O solo presente em uma região é o resultado da interação entre o tipo de rocha pré-existente, seus componentes minerais e o clima local. Os solos são empregados como materiais de construção e como base para estruturas de engenharia. As propriedades e a composição do solo têm uma influência substancial no design e na estabilidade de qualquer fundação e da estrutura sobre ela. Utilizando essas informações, a equipe de projeto pode calcular a capacidade de carga e as pressões de suporte, essenciais para a decisão final sobre as cargas que podem ser adequadamente suportadas (RITTER et al., 2020).

Segundo Poesen (2018), a análise detalhada das características do solo permite uma melhor regionalização das suas propriedades, o que é crucial para áreas urbanas. Além disso, estudos recentes têm demonstrado a importância de entender as variações texturais dos solos para avaliar riscos de erosão e a adequação para construção civil (SOUSA; TIMM; GUEVARA, 2017).

Pesquisas pioneiras também destacam a necessidade de investigação do horizonte subsuperficial, particularmente em regiões onde as características do solo são predominantemente arenosas, como apontado por Montanarella e Panagos (2021). Este conhecimento é vital, especialmente porque solos argilosos são frequentemente considerados mais adequados para construção civil, um contraste com o cenário encontrado em algumas áreas específicas (PINTO, 2006).

Para complementar, Roy e Bhalla (2017) afirmam que as propriedades geotécnicas do solo desempenham um papel crucial na determinação da estabilidade e desempenho das estruturas de engenharia civil.

Uma abordagem prática para identificar a profundidade das camadas naturalmente compactadas devido ao manejo inadequado do solo é utilizando o penetrômetro de impacto (FERREIRA et al., 2022). Este dispositivo é projetado para avaliar a resistência do solo à penetração, consistindo em um peso que realiza quedas controladas para induzir a penetração da haste no solo por meio de impactos. À medida que encontra camadas mais compactadas, a penetração diminui, permitindo identificar essas zonas no perfil do solo. A leitura da penetração é realizada na própria haste, graduada em centímetros.

De acordo com um estudo conduzido por Stolf et al. (2014), as principais vantagens deste equipamento incluem seu baixo custo e a capacidade de trabalhar em solos com alta resistência, baixa umidade e altos teores de argila. Além disso, dispensa o uso de dinamômetro e registrador, o que reduz significativamente os custos em comparação com os métodos convencionais. Não requer calibração, pois a massa do peso, o curso em queda livre e a aceleração da gravidade permanecem constantes. Os resultados obtidos são independentes do operador, e o equipamento é leve e robusto, pesando cerca de 6 kg.

Essas características fazem do penetrômetro de impacto, uma ferramenta eficaz não apenas para identificar camadas compactadas no solo, mas também para realizar medições em diferentes condições climáticas e tipos de solo, conforme discutido por Ferreira et al. (2022).

É importante também ressaltar a caracterização da cobertura do solo e a identificação de indicadores de erosão que são aspectos fundamentais para compreender a vulnerabilidade dos solos a processos erosivos em áreas urbanas. Estes procedimentos não apenas ajudam na avaliação dos riscos ambientais, mas também subsidiam práticas de manejo e conservação adequadas.

A caracterização da cobertura do solo e a identificação de indicadores de erosão são aspectos fundamentais para compreender a vulnerabilidade dos solos a processos erosivos, especialmente em áreas urbanas. Esse entendimento não apenas ajuda na avaliação dos riscos ambientais, mas também subsidia práticas de manejo e conservação adequadas.

A classificação da cobertura do solo, de acordo com a vulnerabilidade à erosão, inclui vegetação natural, áreas agrícolas, zonas urbanas e locais sem cobertura. Cada tipo interfere de forma diferente na capacidade do solo de resistir à erosão. Áreas com vegetação natural, como florestas e cerrados, geralmente são menos suscetíveis, pois as raízes das plantas e a cobertura vegetal protegem o solo contra a ação da água e do vento. Em contrapartida, áreas sem cobertura, como solos expostos e degradados, são mais suscetíveis à erosão (FILIZOLA et al., 2011).

A presença de vegetação em encostas desempenha um papel crucial na mitigação da erosão e na reabilitação de regiões degradadas (MELO et al., 2013). Gramíneas e leguminosas servem para proteger o solo dos efeitos da precipitação e auxiliam na diminuição do escoamento superficial, enquanto as árvores, com seus extensos sistemas de raízes, aumentam a estabilidade do solo e evitam perturbações.

A identificação de indicadores visuais de erosão é um passo crítico nesse processo. Indicadores como pedestais de salpicamento, ravinas, raízes expostas e sedimentação fornecem evidências concretas dos efeitos da erosão e ajudam a entender os processos erosivos específicos que estão ocorrendo em uma área. Pedestais de salpicamento, por exemplo, são crateras criadas pela queda de gotas de chuva, protegidas por rochas ou raízes, enquanto ravinas são canais contínuos ou descontínuos formados pelo fluxo de água superficial (OKOBA; STERK, 2006).

Através do entendimento desses indicadores, medidas de conservação do solo podem ser implantadas, como o plantio de vegetação adequada, a construção de terraços e a instalação de barreiras físicas para reduzir a velocidade do escoamento superficial e proteger o solo da erosão. Esses processos são muito importantes na sustentabilidade ambiental e no desenvolvimento urbano responsável. Dessa forma, além da identificação de áreas com alto potencial de erosão, esses indicadores permitem a introdução de medidas preventivas e corretivas para diminuir os impactos ambientais e promover a sustentabilidade urbana.

Dentre as propriedades físicas, mecânicas e geotécnicas de interesse para o presente trabalho, vale ressaltar as seguintes: densidade do solo, cor, teor de umidade, granulometria e limites de consistência.

A densidade do solo compreende a relação massa sobre volume e tem sua importância especial na estimativa da porosidade do solo, bem como na estimativa da capacidade de infiltrar e/ou estocar água e, também, gases. É calculada como a razão da massa seca do solo com seu volume total (EMBRAPA, 2017).

A cor é uma propriedade amplamente utilizada na classificação dos solos e na diferenciação dos horizontes. A cor do solo está diretamente relacionada às propriedades químicas e físicas do solo e a sua composição biológica e mineralógica, sendo que os principais fatores que influenciam a cor dos solos são a mineralogia, a umidade e o conteúdo de matéria orgânica (DEMATTE et.al., 2011).

A cor do solo é um parâmetro essencial das propriedades e composição do solo, e sua análise pode fornecer informações sobre a sua formação, composição mineralógica, teor de matéria orgânica, permeabilidade, entre outros.

A cor do solo tem impacto no comportamento edáfico, ou seja, influencia nos processos biológicos, físicos e químicos no ambiente, apesar de não ser um fator isolado. Por ser um atributo relacionado à natureza dos constituintes do solo e às condições de sua formação, seu estudo permite compreender melhor as características edáficas, auxiliando na identificação de propriedades como fertilidade, drenagem e capacidade de retenção de umidade. A observação da cor pode fornecer informações sobre o teor de matéria orgânica, a mineralogia presente e as condições de drenagem do solo (BETTIOL et al., 2023).

A cor do solo é reconhecida como uma das propriedades físicas mais significativas, sendo crucial para diferenciar tipos de solo, avaliar o teor de matéria orgânica, o grau de oxidação/hidratação dos compostos férricos e a drenagem do perfil. Ela reflete uma mistura das cores dos componentes do solo, influenciada por agentes pigmentantes como matéria orgânica, que tende a escurecer o solo, especialmente quando úmido, e oxi-hidróxidos de ferro, que conferem tons vermelhos (hematita, quando desidratado) e amarelos (goethita, quando hidratado). Quando há redução do ferro para Fe^{+2} , esses pigmentos perdem efeito, permitindo que minerais como caulinita (na fração argila) e quartzo (na fração areia) expressem suas cores, tornando o solo cinzento (BRADY; WEIL, 2017).

Pesquisadores da área de solos frequentemente utilizam sistemas padronizados para classificar a cor do solo, como a Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1905), que permite descrever a tonalidade com precisão, considerando matiz, valor e croma. Esse método facilita a comunicação entre especialistas e melhora a interpretação dos dados sobre as características do solo. Apesar de parecer um detalhe simples, a cor do solo fornece informações relevantes para diversas áreas de estudo.

O teor de umidade é a determinação quantitativa da fração líquida do solo, independentemente se está localizada no macroporo ou microporo.

A granulometria de um solo refere-se à subdivisão das porções componentes em classes de tamanho, abrangendo tanto materiais de natureza mineral quanto orgânica. Esse processo permite determinar as dimensões das partículas e suas proporções (MORAIS et al., 2021).

A análise granulométrica pode ser realizada de duas maneiras distintas. Uma delas é por meio da sedimentação de um sólido (argilas e siltes) em uma base líquida, para a obtenção das proporções de cada componente. Por outro lado, o peneiramento é utilizado no tratamento de materiais como pedregulhos e areias (grossa, média e fina).

Amostras de solo são submetidas ao processo de peneiramento em uma série de peneiras padronizadas e/ou sedimentação, separando as partículas maiores das menores (EMMERT; PEREIRA, 2016).

A textura do solo desempenha um papel fundamental na compreensão do comportamento e manejo do solo. Ao classificar o solo em uma determinada área, a textura é frequentemente a propriedade inicial e mais importante a ser avaliada.

O limite líquido de um solo é o teor de água, expresso como porcentagem do peso do solo seco em estufa, no limite entre os estados de consistência líquido e plástico do solo. O solo tem resistência ao cisalhamento insignificante. O limite plástico de um solo é o teor de água, expresso como uma porcentagem do peso do solo seco em estufa, no limite entre os estados de plástico e semissólido de consistência do solo (RIBEIRO; SOUZA, 2018).

Limites de Consistência podem ser definidos da seguinte forma: o Limite de Liquidez, que representa a umidade de transição entre os estados plástico e líquido; o Limite de Plasticidade, que corresponde à umidade de transição entre os estados semissólido e plástico; e o Limite de Contração, que representa a umidade de transição entre os estados sólido e semissólido. Dessa maneira, o Índice de Plasticidade é definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (DAS; SOBHAN, 2014).

Esse índice é comumente empregado como um indicador da plasticidade de um solo. Quanto maior a quantidade de argila presente no solo, maior será o índice de plasticidade (IP), o que resulta em um solo mais compressível. A presença de matéria orgânica aumenta o limite de plasticidade (LP) sem afetar o limite de liquidez (LL), consequentemente, diminuindo o IP. A classificação em relação à plasticidade com base no valor do IP é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Classificação dos solos em função do IP, segundo Jenkins (CAPUTO; CAPUTO, 2016).

<i>Denominação</i>	<i>Intervalo de Valores do IP</i>
Fracamente plásticos	$1 < IP < 7$
Medianamente plásticos	$7 < IP < 15$
Altamente plásticos	$IP > 15$

4.3. Propriedades hidrológicas e ecológicas.

4.3.1. Vulnerabilidade Ambiental.

A ocupação desordenada de terrenos, muitas vezes sem a devida análise das condições físicas do solo, acelera o processo natural de erosão. Isso pode ocorrer tanto em áreas ocupadas por pessoas de baixa renda, situadas em zonas de risco, quanto em condomínios de alto padrão construídos em locais inadequados. A erosão, em muitos casos, compromete a infraestrutura e as residências, causando danos significativos à população (HUANG et al., 2021).

A expansão desordenada das cidades ocorreu sem um planejamento adequado e sem considerar os impactos ambientais, o que também influenciou a instalação das redes de infraestrutura urbana. Esse crescimento descontrolado gerou diversos efeitos negativos no meio ambiente, entre eles, o aumento da impermeabilização do solo, que contribui significativamente para a elevação da temperatura e a formação de ilhas de calor. Quanto maior a ocupação caótica do subsolo, menores são as áreas destinadas a espaços verdes e permeáveis, aumentando, assim, a vulnerabilidade das cidades frente às mudanças climáticas (OLIVEIRA; SALLES, 2020).

A recuperação de áreas degradadas exige a implementação de técnicas custosas, frequentemente inacessíveis à maioria dos municípios, considerando as características do solo e a gravidade dos problemas. Segundo Shojaezadeh et al. (2024), os desafios relacionados à erosão não são exclusivos de algumas regiões, mas estão amplamente distribuídos, afetando tanto o meio ambiente quanto as condições socioeconômicas.

Diante desse cenário, é evidente que medidas preventivas seriam mais viáveis e econômicas do que as ações corretivas necessárias após os danos estruturais provocados pela erosão. Avaliar a paisagem e seu nível de vulnerabilidade ambiental, levando em consideração os aspectos físicos e sociais de maneira integrada, é uma estratégia eficiente para reduzir o surgimento de feições

erosivas. De acordo com Wang et al. (2023) é essencial compreender como as áreas urbanas e em processo de urbanização se adaptam às modificações induzidas pela atividade humana.

4.3.2. Erosão.

A erosão é um processo natural essencial para a formação e modelagem do relevo terrestre. No entanto, quando intensificada por atividades humanas, resulta em erosão acelerada, que impede a regeneração do solo e causa diversos problemas ambientais (PANAGOS; BORRELLI; ROBINSON, 2020; LI et al., 2024).

A erosão do solo representa um problema mundial que influencia profundamente várias dimensões da existência humana e ambiental. Conforme observado por Keesstra et al. (2016), as repercussões desse fenômeno são diversas, impactando a segurança alimentar, a qualidade da água e a sustentabilidade dos ecossistemas. A degradação de terras agrícolas causada pela erosão prejudica as capacidades de produção de alimentos, enquanto a sedimentação que decorre da erosão diminui a qualidade da água, afetando assim os ecossistemas aquáticos, bem como a acessibilidade de água potável para uso humano.

Em regiões tropicais e subtropicais úmidas, como o Brasil, a chuva é o principal agente erosivo. Estudos recentes indicam que as chuvas intensas nessas áreas são o fator dominante na erosão do solo (HERNANI, 2021). As gotas de chuva desagregam as partículas do solo ao atingirem a superfície, removendo-as, o que é agravado pela ausência de cobertura vegetal e pela presença de terrenos inclinados (BUENO et al., 2022). Esses fatores aumentam significativamente a vulnerabilidade do solo à erosão, resultando em impactos ambientais e estruturais consideráveis.

Bueno et al. (2022) destacam que fatores naturais, como a declividade do terreno, a pluviosidade e a cobertura vegetal, são determinantes no processo erosivo. Contudo, a ocupação humana acelera esse processo, reduzindo a capacidade de absorção de água do solo e sua resistência natural, tornando-o mais suscetível à ação do vento e da água.

A erosão pode ser acelerada por atividades humanas, como o desmatamento e a agricultura intensiva, apesar de alterar a superfície terrestre naturalmente ao longo do tempo geológico (ALVES et al., 2023). Souza (2015) oferece uma perspectiva geológica, descrevendo a erosão como um processo que atua sobre as elevações e depressões do relevo, promovendo seu

nivelamento. Cada fase erosiva (gliptogênese) é acompanhada por uma fase de sedimentação (litogênese), criando um ciclo contínuo de desgaste e deposição de materiais.

A erosão hídrica do solo ocorre devido à interação entre a chuva e fatores como a topografia, o tipo de solo e a cobertura vegetal. Práticas de manejo e técnicas conservacionistas podem mitigar os impactos da erosão hídrica. A erosão é um processo de desgaste da superfície terrestre, resultante de agentes erosivos como água, vento e gelo, além de fatores biológicos e químicos que influenciam a desagregação e o transporte das partículas do solo (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

A erosão, embora, seja um processo natural essencial para a formação do relevo, quando intensificada por fatores humanos, pode se tornar um problema ambiental grave. Compreender seus agentes, tanto naturais quanto antropogênicos, é fundamental para diminuir seus efeitos e promover a sustentabilidade do solo.

4.3.3. Carbono orgânico total do solo (COT).

O carbono orgânico total do solo (COT) é reconhecido como um componente vital para a operação de ecossistemas terrestres, cumprindo vários papéis que influenciam significativamente a estabilidade e a produtividade do solo. Conforme observado por Jackson et al. (2017), o COT serve como a principal fonte de energia para microrganismos do solo e é fundamental na preservação da estrutura do solo, ao mesmo tempo em que regula serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo retenção de água e emissões de gases de efeito estufa. Esse carbono se origina tanto de materiais vegetais, provenientes das partes aéreas e radiculares das plantas, quanto dos produtos secundários sintetizados pelos organismos do solo. Este reservatório de carbono é vasto, com estimativas indicando que ele contém mais de três vezes a quantidade de carbono presente na atmosfera (SCHARLEMANN et al. 2014). No entanto, o COT tem sido reduzido devido a mudanças na cobertura do solo e práticas de manejo insustentáveis ao longo do tempo, especialmente no contexto do Antropoceno (MALHOTRA et al. 2019). A reversão dessa degradação, por meio de práticas de manejo sustentável, é ainda um tema de debate, mas há evidências de que aumentar o armazenamento de COT em terras agrícolas pode ajudar a reduzir a carga de CO₂ na atmosfera, com impactos positivos nos ciclos climáticos (MAYER et al. 2018). Esse processo de gestão eficaz requer uma compreensão profunda da dinâmica do COT e sua

interação com as variáveis ambientais, uma área de crescente interesse científico (SMITH et al. 2019). Desde o início da década de 2000, as metodologias para mensuração do COT têm evoluído. Atualmente, a padronização das técnicas de amostragem e análise, como a implementação de abordagens em diferentes níveis de complexidade, tornou-se cada vez mais importante. Técnicas padrões desde a quantificação básica do COT até as análises que incorporam variáveis biológicas, físicas e químicas são essenciais para garantir a comparabilidade dos dados e fornecem uma base sólida para modelos globais do ciclo do carbono (WEINTRAUB et al. 2019). O COT desempenha um papel vital na manutenção dos ecossistemas, e a padronização metodológica e, aliada ao aumento dos esforços de monitoramento e compartilhamento de dados gerados por redes de pesquisa, é fundamental para o avanço do entendimento sobre a dinâmica do COT e suas implicações para o clima global (MALHOTRA et al. 2019).

Em ambientes terrestres, o carbono orgânico total do solo (COT) é reconhecido como um elemento central que sustenta diversos processos ecológicos e biogeoquímicos. Funcionalmente, o COT representa a principal fonte de energia para os microrganismos edáficos e exerce papel determinante na manutenção da estrutura do solo, influenciando a produtividade dos ecossistemas, a disponibilidade de nutrientes e a regulação de serviços ecossistêmicos, como a retenção de água e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (JACKSON et al. 2017).

A origem do COT é multifacetada, derivando tanto de materiais vegetais, oriundos das partes aéreas e radiculares das plantas, quanto dos produtos secundários sintetizados pelos próprios organismos do solo. Esse conjunto de contribuições resulta em um reservatório edáfico que, segundo estudos, pode alcançar volumes expressivos. No entanto, a degradação progressiva desse reservatório tem sido observada devido às mudanças na cobertura vegetal e às práticas de manejo insustentáveis no contexto do Antropoceno (SANDERMAN; HENGL; FISKE, 2017).

A discussão acerca da reversão desse processo por meio de práticas de manejo sustentável tem ganhado destaque, especialmente considerando que o aumento do armazenamento de COT, em áreas agrícolas, demonstra potencial para reduzir a concentração de CO₂ na atmosfera (MAYER et al. 2018). Além disso, a quantificação precisa dos estoques de COT e a compreensão dos mecanismos que regulam sua dinâmica são fundamentais para aprimorar os modelos do ciclo global do carbono e melhorar as projeções das mudanças climáticas (SMITH et al. 2019).

De acordo com Al-Shammery et al. (2018), nesse cenário, a adoção de métodos padronizados para a mensuração do COT revela-se imprescindível. Abordagens que variam desde

a determinação básica da concentração de COT e da densidade do solo (Tier 1) até a incorporação de variáveis adicionais que englobam aspectos biológicos, físicos e químicos (Tiers 2 e 3) têm sido propostas com o intuito de reduzir a variabilidade dos dados e aumentar a comparabilidade entre estudos. Tais práticas vêm sendo integradas em redes de pesquisa internacionais, as quais contribuem significativamente para a harmonização de grandes conjuntos de dados edáficos (características físicas, químicas, biológicas e mineralógicas) (WEINTRAUB et al. 2019).

O COT desempenha papel crucial na sustentação e regulação dos processos ecológicos em ambientes terrestres, sendo um componente vital na modulação do ciclo do carbono e dos feedbacks climáticos. A integração de práticas de manejo sustentável e de metodologias padronizadas de coleta e análise é fundamental para ampliar a compreensão dos mecanismos que regem a dinâmica do COT e para promover a conservação dos recursos edáficos em escala global (BILLINGS et al., 2021).

4.3.4. Erodibilidade do solo.

Um parâmetro importante para compreender processos de erosão é a erodibilidade do solo, pois significa a capacidade inerente do solo de suportar o deslocamento de partículas por forças naturais, incluindo água e vento. Esse atributo é frequentemente incorporado em modelos preditivos, como a Universal Soil Loss Equation (USLE), que emprega o fator K para avaliar a vulnerabilidade à erosão (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997).

Estudos recentes têm demonstrado que as propriedades edáficas, tais como a composição granulométrica e o teor de matéria orgânica, exercem influência significativa sobre a erodibilidade. Por exemplo, Mannigel et al. (2002) propuseram uma abordagem empírica para a determinação do fator de erodibilidade com base nas frações de areia, silte e argila, evidenciando que solos com maiores porcentagens de areia e silte, em comparação aos de argila, tendem a ser mais suscetíveis à erosão. De forma complementar, Salomão e Silva (2021) realizaram um estudo em bacias hidrográficas brasileiras, demonstrando que, mesmo em áreas com elevado potencial natural de erosão, a presença de vegetação pode reduzir as perdas de solo por meio da melhoria da estrutura edáfica.

A influência das mudanças na cobertura do solo tem sido amplamente documentada. Fasika, Motuma e Gizaw (2019) apontaram que as intervenções no uso do solo, como a conversão de áreas

de vegetação nativa para ocupação humana, intensificam os processos erosivos, enquanto Pathan e Sil (2020) enfatizaram que a priorização de áreas suscetíveis à erosão é fundamental para a implementação de políticas de conservação. Nesse cenário, as Nações Unidas já reconheceram a erosão do solo como uma preocupação ambiental global, integrando esforços para a mitigação desse problema na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (UN, 2015).

Estudos regionais, como o de Vasconcelos et al. (2018), demonstram que, em regiões de forte pressão urbana, as alterações na cobertura do solo podem reduzir a qualidade dos solos e aumentar sua erodibilidade, contribuindo para a intensificação dos problemas de inundação e siltificação dos corpos d'água. Assim, a compreensão dos fatores que influenciam a erodibilidade é crucial para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável que visem à conservação dos recursos edáficos e à mitigação dos impactos ambientais decorrentes da erosão.

4.3.5. Gradiente Textural – Variação da Textura do Solo entre Horizontes.

O gradiente textural corresponde à relação entre a quantidade de argila presente no horizonte subsuperficial em comparação com o horizonte superficial. Esse índice é calculado pela razão entre a média da porcentagem de argila do horizonte subsuperficial e a média da porcentagem do mesmo componente no horizonte superficial. Valores elevados de gradiente indicam acúmulo expressivo de argila em profundidade, frequentemente associado a processos de iluviação. A interpretação desse parâmetro é relevante para a classificação taxonômica do solo, sendo utilizado, por exemplo, para diferenciar classes como Argissolos e Nitossolos (SANTOS et al., 2018). Além disso, o gradiente textural auxilia na identificação do potencial de uso e manejo dos solos tropicais, especialmente no que se refere à infiltração de água, à retenção de nutrientes e ao comportamento mecânico frente às práticas agrícolas ou de engenharia (PRADO; PRADO, 2022).

O cálculo do gradiente textural pode ser estendido para outras frações granulométricas além da argila, como areia grossa, areia fina e silte, embora o uso tradicional e mais difundido seja com base na fração argila, devido à sua maior influência nas propriedades físico-químicas do solo.

No entanto, em estudos de classificação, erosão, suscetibilidade a compactação ou até comportamento hidromecânico, analisar gradientes texturais com outras frações pode ser relevante.

4.4. Modelos Estatísticos de caracterização geotécnica, hidrológica e ecológica do solo.

A estatística é aplicada em várias áreas do conhecimento humano, atuando com uma função essencial na coleta, estruturação, exibição e análise de dados. No entanto, um erro comum na prática contemporânea é a condução de análises estatísticas sem uma compreensão completa das teorias e conceitos fundamentais inerentes a este conceito. Conforme observado por Guedes et al. (2023), o advento de softwares computadorizados permitiu a execução rápida e eficaz de cálculos complexos, porém, a interpretação errônea dos dados resultantes pode levar a conclusões inadequadas.

Segundo Guedes et al. (2023), os métodos estatísticos podem ser classificados em três categorias: estatística descritiva, estatística inferencial e probabilidade. A estatística descritiva organiza e condensa conjuntos de dados, com uma representação clara de suas variações, que é alcançada por meio da utilização de tabelas, gráficos e medidas descritivas, incluindo aquelas relacionadas à posição e dispersão. Estatísticas inferenciais se baseiam nos princípios da teoria da probabilidade, permitindo a análise de dados e a formulação de conclusões sobre populações derivadas de amostras. A probabilidade examina a possibilidade de eventos particulares ocorrerem, sustentando assim técnicas inferenciais ao oferecer estruturas matemáticas que caracterizam a incerteza inerente aos dados. O termo estatística pode ser entendido de diferentes formas. No sentido singular, refere-se à teoria e aos métodos estatísticos; por outro lado, quando utilizado no plural, diz respeito aos dados numéricos ou medidas calculadas a partir de conjuntos de dados. Independentemente da abordagem adotada, é fundamental compreender plenamente os princípios e métodos da estatística para utilizá-la de maneira eficaz, garantindo análises confiáveis e interpretações precisas.

No ramo da Engenharia Civil tem-se utilizado a estatística como uma ferramenta crucial para a análise e melhoria de processos, especialmente na área de estabilização do solo. Ikeoka (2022) investigou o emprego de métodos estatísticos na avaliação da correção do solo por meio da utilização de cal e cimento, dando destaque à sua relevância no aprimoramento das características geotécnicas dos materiais.

Assim, o emprego da estatística na área da engenharia geotécnica destaca a necessidade de embasar decisões técnicas em dados concretos, assegurando maior precisão e confiabilidade nas práticas construtivas.

A pesquisa conduzida por Cornélio et al. (2021) ressalta a importância tanto da estatística descritiva quanto da geoestatística no exame da variabilidade espacial das características do solo, facilitando assim uma caracterização mais precisa de suas propriedades físicas e químicas. São ilustradas como as técnicas variadas de georreferenciamento podem afetar a interpretação dos dados coletados, o que por sua vez impacta a confiabilidade das análises espaciais. Por meio do uso de métodos estatísticos, o estudo identificou padrões de distribuição de variáveis do solo, destacando que a seleção cuidadosa de abordagens estatísticas e grades de amostragem é crucial para alcançar resultados mais representativos. Logo, é enfatizada a necessidade de empregar técnicas estatísticas para aprimorar a tomada de decisões no campo da ciência do solo, auxiliando assim a pesquisa focada no manejo, conservação e utilização sustentável dos recursos naturais.

A correta interpretação dos dados estatísticos proporciona uma série de vantagens para a engenharia de solos, tais como: maior confiabilidade nos estudos geotécnicos, reduzindo incertezas na caracterização dos materiais, otimização no dimensionamento de fundações e estruturas de contenção, ajustando os projetos às condições reais do solo, prevenção de problemas estruturais, como recalques excessivos, deslizamentos de terra e instabilidade de taludes, tomada de decisões mais seguras na escolha dos materiais e nas técnicas construtivas aplicadas a cada obra.

A estatística descritiva é importante no estudo de solos e de estruturas de construção. Sua correta aplicação permite que as decisões sejam baseadas em dados concretos e análises mais precisas, diminuindo os riscos e aumentando a confiabilidade das análises geotécnicas.

No campo das engenharias, a aplicação de métodos estatísticos frequentemente encontra dificuldades decorrentes das complexidades e flutuações de dados experimentais, que podem não estar em conformidade com uma distribuição normal. Assim, testes não paramétricos apresentam-se como alternativas adequadas para a condução de análises estatísticas, pois não dependem de suposições de normalidade ou homogeneidade de variância. Essa característica garante resultados mais confiáveis nas situações em que abordagens paramétricas mostram-se inadequadas (NIEDOBA et al., 2023).

O teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952) destaca-se como uma importante ferramenta na análise estatística aplicada a estudos sobre comportamento ambiental, especialmente quando a aplicação dos testes paramétricos não é adequada.

A utilização do teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952) foi eficaz na avaliação da precisão dos métodos não destrutivos (NDT) para a estimativa do comprimento dos

tirantes de solo. O emprego do teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952) apresentou como principal vantagem a análise de dados que não seguem uma distribuição normal, garantindo a confiabilidade dos resultados (WANG et al., 2023).

Keane et al. (2025) analisaram de que forma diferentes estratégias de comunicação podem influenciar a maneira como as pessoas percebem as mudanças climáticas e, a partir disso, estimular atitudes mais conscientes em relação ao meio ambiente. Para isso, os autores utilizaram o teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952) na comparação entre os grupos e a correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904) para avaliar as associações entre as variáveis. Um dos principais resultados do estudo mostrou que quando as mensagens despertam sentimentos de afeto ou apego por elementos da natureza, as pessoas tendem a se envolver mais e a perceber as mudanças climáticas como algo mais próximo e real. Essa conclusão chama atenção para a importância de incorporar fatores simbólicos e emocionais em discussões ambientais, o que também se relaciona com este trabalho, que busca integrar aspectos ecológicos à análise da instabilidade dos solos, reconhecendo que a percepção e o cuidado com o ambiente também passam por vínculos subjetivos com o território.

Além do teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952), que compara as medianas de uma mesma variável de três ou mais grupos independentes para identificar diferenças significativas, a correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904) se destaca por avaliar a intensidade e a direção da associação entre duas variáveis de um mesmo grupo, mesmo quando os dados não apresentam uma distribuição normal.

Baseado nos postos das observações, o coeficiente de Spearman (SPEARMAN, 1904) permite identificar associações mesmo em situações em que os valores são discrepantes ou as relações não são lineares. Esse método é menos sensível a valores extremos e proporciona uma análise mais precisa das dependências entre as variáveis (ZHANG, 2023).

Segundo Ribeiro et al. (2016), a correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904) foi utilizada para analisar as relações entre os parâmetros físico-químicos da água na bacia do Ribeirão Anicuns, em Goiânia, durante o ano de 2015. Esse método, por ser não paramétrico, mostrou-se eficaz na análise mais precisa das informações coletadas tanto nos períodos de chuva quanto de estiagem.

De acordo com Vázquez-Guillén e Auvinet-Guichard (2018), modificações em métodos clássicos de confiabilidade estrutural foram propostas para lidar com incertezas não gaussianas na análise da fragilidade de estruturas, relacionados a elementos de contenção em obras geotécnicas.

Nesse contexto, o coeficiente de Spearman (SPEARMAN, 1904) foi proposto como uma solução eficiente para tratar variáveis com diferentes distribuições de probabilidade, proporcionando uma análise mais precisa das incertezas envolvidas. Na área da geotecnia, essa abordagem é especialmente útil para estimar a probabilidade de falha de fundações e outras estruturas, evitando hipóteses inadequadas sobre os modelos teóricos das curvas de fragilidade e garantindo maior segurança nas avaliações realizadas.

A Análise Discriminante Multivariada (ADM) é uma técnica estatística que tem sido amplamente adotada em estudos aplicados à área ambiental e geotécnica, principalmente por permitir distinguir grupos previamente estabelecidos com base em características quantitativas. Esse método tem se mostrado útil para diferenciar classes de solos que apresentam variações nas propriedades físicas, químicas e hidromecânicas. Como destacam Rencher e Christensen (2012), a ADM contribui para uma análise mais aprofundada ao mostrar não apenas o grau de separação entre os grupos, mas também ao evidenciar quais variáveis têm maior peso nessa distinção. A utilização da Análise Discriminante Multivariada (ADM) tem se mostrado vantajosa em estudos com solos por possibilitar a distinção entre diferentes grupos com base em variáveis físico-químicas. Em outro estudo, Rajarathinam e Ramji (2023) demonstraram que, ao aplicar essa técnica em solos arenosos, foi possível classificá-los conforme seus níveis de pH, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e potássio. A análise apresentou um índice de acerto significativo, reforçando a utilidade da ADM como ferramenta de diagnóstico e apoio ao manejo mais eficiente do solo. Isso favorece práticas agrícolas mais sustentáveis e adaptadas às reais condições edáficas de cada área analisada.

4.4.1. Modelagem estatística: Funções de Pedotransferência (FPTs).

Funções de pedotransferência (FPTs) são equações, geralmente de primeiro ou segundo grau, formuladas a partir de bases de dados pedológicas que incluem informações físicas, químicas e hidrológicas. As funções de pedotransferência (FPTs) configuram-se como ferramentas estatísticas essenciais para a estimativa indireta de propriedades do solo a partir de atributos mais facilmente mensuráveis. Essas funções consistem em equações desenvolvidas a partir de dados físicos, químicos e hidrológicos, capazes de prever características como a curva de retenção de água e a condutividade hidráulica (WEBER et al., 2024) a partir de atributos mais facilmente

mensuráveis, como a granulometria, densidade e teor de matéria orgânica. Como observado por Silva e Armindo (2016), a proposta central das FPTs é transformar dados acessíveis em informações complexas, muitas vezes de obtenção laboriosa.

A regressão linear múltipla é uma das abordagens estatísticas mais utilizadas na elaboração de FPTs, especialmente por permitir a consideração simultânea de diferentes atributos do solo, como textura, densidade, matéria orgânica e porosidade. Essa técnica possibilita gerar equações ajustadas que estimam, com boa acurácia, propriedades físico-hídricas como a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a condutividade hidráulica saturada. Veloso, Rodrigues e Ottoni (2024) aplicaram essa metodologia na construção de FPTs específicas para o bioma Cerrado, com base em uma base de dados abrangente e regionalizada. Os modelos gerados permitiram representar com consistência a variação dos atributos do solo e contribuíram para o aprimoramento do planejamento do uso da terra e da gestão hídrica na região.

A retenção de água no solo é determinada por fatores como a fração argilosa, estrutura, densidade do solo e microporosidade, sendo sua mensuração direta frequentemente morosa e suscetível a histerese. Nesse contexto, a utilização de FPTs tem se mostrado eficaz na estimativa da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível, com base em variáveis físicas de fácil obtenção (ANDRADE et al., 2020).

Além de sua aplicação na estimativa de propriedades do solo, as FPTs são valiosas quando integradas a outras informações ambientais. Elas podem ser combinadas com dados de mapeamento digital do solo, parâmetros topográficos e variáveis climáticas para gerar bancos de dados mais robustos e adaptáveis a diferentes escalas de análise. Esse tipo de integração tem viabilizado o uso das FPTs em análises geoespaciais com aplicação em planejamento hídrico e gestão territorial sustentável (BENIAICH et al., 2023).

Uma regra fundamental é que os parâmetros utilizados nas equações sejam mais facilmente obtidos do que o parâmetro a ser estimado. Assim, a filosofia da geração de FPTs se baseia na "transformação de dados que possuímos em dados que precisamos" (VAN LOOY et al., 2017).

Exemplificando, Urban (2011) gerou várias equações que caracterizam FPTs para uma microbacia hidrográfica localizada em Sorocaba (SP), duas delas, equações 4.1 e 4.2, são apresentadas abaixo.

$$N = 7,425 \cdot 10^{-4} \cdot CE^{0,952} \quad (4.1)$$

$$C = 0,0137 \times (CE^{0,889}) \quad (4.2)$$

onde, para ambas as equações: CE – condutividade elétrica, C – teor de carbono; N – teor de nitrogênio.

Neste caso a condutividade elétrica é um parâmetro muito mais fácil de ser analisado do que o teor de C ou de N, por isso estas equações constituem FPT e o coeficiente de determinação obtido atestou a validade e confiabilidade do modelo.

Também, para solos mexicanos Trejo-Alonso et al. (2020) encontraram boa correlação estatística analisando a relação entre o teor de argila do solo (informação existente) com a condutividade hidráulica do solo em estado saturado (informação calculada). Uma das equações (Equação 4.3) considerada pelos autores para calibração dos parâmetros foi:

$$K_s = a.\exp^{(b \cdot Cl)} \quad (4.3)$$

onde, K_s – condutividade hidráulica do solo em estado saturado, Cl – teor de argila, “a” e “b” são constantes para calibração.

Chen et al. (2024) analisaram um conjunto de equações para melhor estimar a relação entre concentração de carbono no solo e a densidade do solo, para posteriormente estimar o estoque de carbono no solo, para um contexto global no continente europeu. Dentre as equações consideradas pelos autores para calibração dos parâmetros, cita-se a Equação 4.4:

$$D_s = a.CO^b \quad (4.4)$$

onde, D_s – densidade do solo ($mg.cm^{-3}$), CO – carbono orgânico (%), “a” e “b” são constantes para calibração.

4.5. Modelagem Cartográfica como ferramenta para subsidiar a caracterização pedológica local ou regional.

A modelagem cartográfica tem sido amplamente utilizada para diagnosticar características do meio físico, biológico, ecológico e antrópico. Além disso, essa ferramenta permite prever impactos ambientais decorrentes de alterações no uso do solo por meio de simulações e identificar áreas com diferentes graus de vulnerabilidade à degradação.

Diversos modelos vêm sendo desenvolvidos para correlacionar parâmetros do solo, tanto no campo da geotecnia, que avalia as relações hidromecânicas dos solos, quanto na ecologia, que analisa suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Assim, a criação de modelos integrados pode fornecer informações mais abrangentes e detalhadas, superando as limitações dos modelos geotécnicos e ecológicos isolados.

A produção de mapas voltados para a engenharia ambiental e civil exige o emprego de abordagens e métodos específicos que possibilitem organizar e interpretar dados geoespaciais de maneira integrada. Dentre esses métodos, o sensoriamento remoto se sobressai por possibilitar a coleta de informações sobre a superfície terrestre por meio de imagens obtidas por satélites, aviões e drones.

Conforme Jensen (2009), essa abordagem possibilita a coleta de dados em larga escala e com mínima interferência no ambiente analisado, sendo amplamente utilizada no mapeamento de uso e ocupação do solo, identificação de áreas suscetíveis à erosão, movimentações de massa, subsidência, expansão urbana desordenada e em estudos de degradação ambiental. Avanços recentes, como o uso de sensores ópticos, multiespectrais e radar de abertura sintética (SAR), têm aprimorado a precisão na detecção de variações morfológicas e estruturais do terreno, essenciais para a modelagem hidrológica, avaliação da estabilidade de encostas e planejamento urbano sustentável. Além disso, a integração de técnicas de sensoriamento remoto com sistemas de informações geográficas (SIG) tem se mostrado eficaz na análise de suscetibilidade a deslizamentos e na gestão de riscos geotécnicos. Assim, o sensoriamento remoto consolida-se como uma ferramenta estratégica na geotécnica aplicada à engenharia contemporânea, especialmente no monitoramento preventivo de riscos e no apoio ao diagnóstico ambiental em larga escala.

Souza (2019) discute as possibilidades e desafios associados ao uso de modelos digitais de elevação obtidos por sensores remotos para estimar os volumes das superfícies topográficas que sofreram alterações com a implantação de uma rodovia. A abordagem considera a precisão dos dados gerados, as limitações tecnológicas e metodológicas, bem como as implicações para o planejamento e a execução de obras viárias.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm se consolidado como ferramentas indispensáveis na engenharia ambiental e civil, permitindo a integração de dados espaciais com análises avançadas para apoiar decisões estratégicas. Essa tecnologia facilita o desenvolvimento de mapas interativos e a realização de análises espaciais complexas, essenciais para o planejamento urbano e a gestão ambiental. Segundo Longley et al. (2015), os SIG são amplamente utilizados devido à sua capacidade de organizar e articular sistematicamente dados geoespaciais. Estudos recentes destacam a aplicação dos SIG na identificação de áreas suscetíveis a riscos geotécnicos e na otimização do uso do solo, contribuindo para o desenvolvimento urbano sustentável.

O crescimento populacional e a intensificação das atividades econômicas têm impulsionado a exploração dos recursos naturais, resultando em uma degradação progressiva das reservas florestais. Para compreender melhor esses impactos e subsidiar a formulação de políticas ambientais mais eficazes, o uso de tecnologias como o sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) torna-se indispensável no monitoramento das mudanças no uso e ocupação do solo. Essas ferramentas permitem análises espaciais detalhadas, facilitando a identificação de padrões de degradação florestal ao longo do tempo e contribuindo para o planejamento de estratégias voltadas à conservação e recuperação dessas áreas. Além do acompanhamento da perda de vegetação, tais recursos também favorecem a previsão de tendências futuras, o que é fundamental para a atuação preventiva e a elaboração de políticas públicas sustentáveis (ADEDEJI; TOPE-AJAYI; ABEGUNDE, 2015).

Nesse contexto, técnicas de interpolação espacial complementam as análises realizadas em ambiente SIG, permitindo a construção de superfícies contínuas a partir de dados pontuais. Essa integração amplia a capacidade de interpretar aspectos físicos do território e de compreender a distribuição de fenômenos ambientais e sociais que afetam essas áreas. A interpolação de dados espaciais tem sido particularmente útil em estudos voltados à Engenharia Ambiental e Geotécnica, onde a representação de variáveis como precipitação, umidade do solo e densidade de vegetação é essencial para diagnósticos precisos (TRALDI et al., 2022).

Entre os métodos disponíveis, o IDW (Inverse Distance Weighting) é amplamente empregado por sua simplicidade e pela lógica intuitiva com que distribui pesos às amostras: valores mais próximos do ponto estimado recebem maior influência, enquanto os mais distantes têm peso reduzido. Essa abordagem apresenta bons resultados em áreas com distribuição relativamente homogênea dos dados (COSTA et al., 2025).

Em situações em que os dados apresentam padrões de distribuição mais irregulares ou uma variabilidade espacial acentuada, o uso de métodos como a Krigagem tende a ser mais apropriado. Diferente de técnicas mais simples, ela considera a correlação entre os pontos amostrados, o que favorece a produção de estimativas mais consistentes. Esse método tem sido particularmente útil em análises relacionadas ao comportamento do solo e à dinâmica de variáveis ambientais, como a pluviosidade e a umidade do terreno (FRANCISCO et al., 2024).

Outro procedimento bastante adotado é a interpolação por splines, que utiliza funções matemáticas suaves para criar superfícies contínuas e com transições mais naturais. Essa técnica costuma ser escolhida quando se deseja representar com mais fidelidade as nuances do terreno, principalmente em análises hidrológicas e de relevo (CONCHA; ALVAREZ-ICAZA, 2018).

A escolha entre essas abordagens depende das características do banco de dados e do propósito da análise. No contexto da engenharia ambiental e civil, esses métodos contribuem significativamente para a interpretação do espaço, o diagnóstico de áreas de risco e o planejamento técnico com base em evidências geoespaciais.

5. MATERIAL E MÉTODOS.

5.1. Área de Estudo: Localização.

O presente estudo foi desenvolvido no município de Sorocaba (Figura 5.1), localizado no interior do estado de São Paulo, entre as coordenadas 23°30'22"S e 47°27'21"W (MACHADO-HESS, 2020).

Com área territorial de aproximadamente 450 km², Sorocaba apresenta uma diversidade de usos e ocupações do solo, resultando num mosaico de classes de cobertura da terra. As modalidades de uso do solo incluem áreas urbanas densamente povoadas, zonas industriais, áreas rurais e fragmentos remanescentes de vegetação nativa, alguns voltados para conservação (MAPBIOMAS, 2023).

O relevo do município de Sorocaba é caracterizado por formas onduladas a suavemente onduladas, com altitudes que variam entre 550 e 750 metros, predominando colinas e planícies fluviais ao longo da rede hidrográfica (IBGE, 2022a; SOROCABA, 2024a). Essa conformação favorece o escoamento superficial e influencia diretamente os processos erosivos em áreas com menor cobertura vegetal. Quanto aos solos, predominam os Latossolos Vermelhos e Argissolos, com variação textural entre franco-arenosa e argilosa, apresentando distintos graus de coesão e resistência à erosão, o que afeta a estabilidade dos solos frente ao uso antrópico e à urbanização (EMBRAPA, 2018; ROSSI, 2017).

Em relação à vegetação, Sorocaba originalmente fazia parte do domínio da Mata Atlântica, com ocorrência predominante de florestas estacionais semidecíduais. Atualmente, a cobertura vegetal encontra-se bastante fragmentada, com remanescentes distribuídos em áreas de proteção ambiental, matas ciliares e encostas, refletindo a intensa transformação do território urbano. Estudos florísticos realizados na região confirmam a presença de espécies típicas da floresta estacional e apontam a importância ecológica desses remanescentes na manutenção da biodiversidade local (KORTZ et al., 2014).

A rede hidrográfica do município é estruturada principalmente pelo rio Sorocaba, que corta a cidade no sentido sul-norte e deságua no rio Tietê, sendo alimentado por afluentes como os córregos Pirajibu, Ipanema e Tatuí (NUNES; GUANDIQUE, 2022).

Geologicamente, Sorocaba encontra-se em uma zona de transição entre rochas sedimentares da Bacia do Paraná, como as do Grupo Itararé, e rochas cristalinas do embasamento pré-cambriano, o que contribui para a diversidade físico-química dos solos locais (SOROCABA, 2024a).

Conforme já exposto, a cobertura da terra é composta por um mosaico heterogêneo que inclui áreas urbanizadas, loteamentos em expansão, zonas industriais, áreas agrícolas, pastagens e vegetação secundária. Esse cenário de intensa modificação territorial tem implicações diretas sobre os processos de instabilidade e degradação dos solos, aspectos centrais abordados nesta pesquisa (SOROCABA, 2024b).

O clima de Sorocaba é classificado como subtropical úmido (Cfa), segundo Köppen (ALVARES et al., 2013), com verões quentes e úmidos e invernos mais secos. A temperatura média anual gira em torno de 20,5°C, com precipitação média de aproximadamente 1219 mm por ano (INMET, 2021).

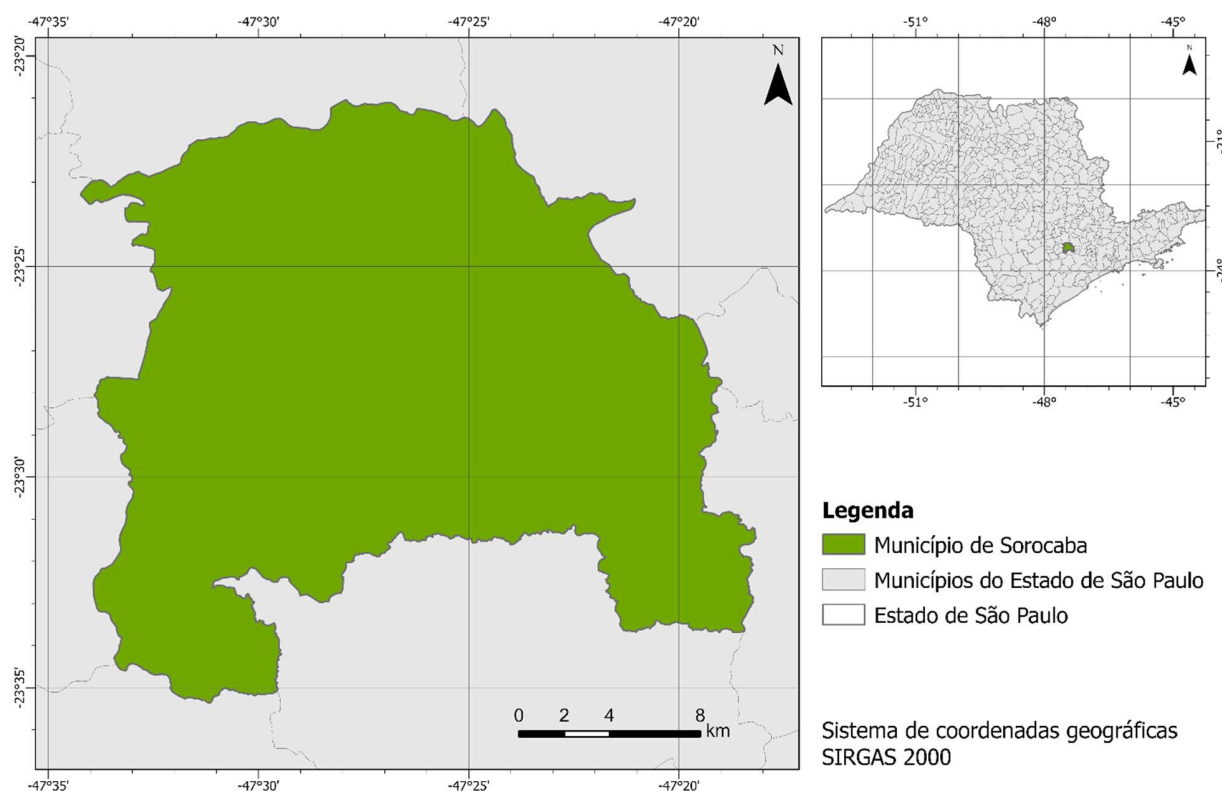


Figura 5.1. Localização da área de estudo. Município de Sorocaba, estado de São Paulo.

Fonte: elaboração própria.

5.2. Procedimentos de campo.

Os procedimentos de campo constituíram uma etapa essencial desta pesquisa, permitindo a obtenção de dados primários para a caracterização eco-hidro-geotécnica dos solos do município de Sorocaba (SP). A campanha de campo foi realizada no período de 18 a 22 de julho de 2022, contemplando diferentes áreas do município.

5.2.1. Determinação dos Pontos de Amostragem e Coordenadas x e y.

O processo aplicado na coleta de amostras de solo no município de Sorocaba foi detalhado e rigoroso, com o objetivo de assegurar a precisão dos dados e a confiabilidade das análises subsequentes, especialmente voltadas à área ambiental e da construção civil. Ao todo, foram amostrados 65 pontos distribuídos estrategicamente em diferentes setores do território municipal, contemplando distintas condições de cobertura do solo.

A área de estudo corresponde à região geopolítica de Sorocaba, onde os pontos de amostragem foram definidos com base na técnica de estratificação aleatória (ZHAO et al., 2023). Essa estratificação considerou a categorização da paisagem, em especial os diferentes tipos de cobertura da terra. Dentro de cada categoria, os pontos de coleta foram escolhidos de forma aleatória, garantindo representatividade e diversidade ambiental.

Em cada um dos 65 pontos amostrados, foram registradas as coordenadas geográficas (x e y) com o uso de equipamento receptor GPS de alta precisão (sistema de projeção UTM, datum SIRGAS 2000), o que assegurou a localização exata dos locais de coleta e permitiu a compatibilidade com futuros estudos georreferenciados. As informações geográficas foram registradas manualmente em fichas específicas de campo e sistematizadas na Tabela A.1, apresentadas no Apêndice A.

5.2.2. Obtenção das Amostras de solo.

Para a obtenção das amostras de solo, foram retiradas, em cada ponto de coleta, duas amostras lado a lado, sendo uma indeformada e uma deformada, tanto no horizonte superficial quanto no subsuperficial. As amostras indeformadas foram coletadas, de forma experimental e

sempre que possível, utilizando anéis rígidos de Polietileno Tereftalato (PET). No entanto, quando a rigidez do solo era elevada e as tampas plásticas se deformavam, optou-se pela utilização de cilindros metálicos. Em situações específicas, em que o solo apresentava alta compactação superficial e resistência à escavação manual, foi necessário o uso de perfuratriz motorizada para viabilizar a coleta adequada das amostras (Figura 5.2). Já as amostras deformadas foram retiradas com o auxílio de enxada, totalizando cerca de 1 kg de solo por ponto. Todas as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetadas, e transportadas ao laboratório. Após a chegada, foram armazenadas em sala apropriada para evitar a perda de umidade, preservando suas propriedades naturais para os ensaios posteriores.



Figura 5.2. Utilização de perfuratriz motorizada para coleta de solo superficial em área de vegetação nativa. Fonte: autora. Data: 20 jul. 2022.

5.2.3. Determinação da Cobertura do Entorno.

Em cada ponto de amostragem, a categorização da cobertura do entorno foi realizada com base em observações diretas de campo, utilizando como referência a classificação temática

disponibilizada pelo projeto MapBiomias (2023), por apresentar maior compatibilidade com os níveis de detalhamento locais.

As categorias originalmente atribuídas, como vegetação natural (cerrado, floresta semidecidual, mata ciliar), áreas agrícolas (gramíneas, eucalipto, pasto, queimadas, reflorestamentos), áreas urbanas (com presença de edificações, calçadas e ruas pavimentadas) e áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal (solo exposto, mata degradada, bambuzal), foram descritas conforme a situação observada em campo.

Cabe destacar que, embora os termos do MapBiomias (2023) tenham sido empregados como base descritiva, sua aplicação no presente estudo teve caráter adaptativo, orientado pelas condições visuais e ambientais predominantes no entorno imediato de cada ponto de coleta.

Não se tratou da criação de uma nova tipologia ou de uma sistematização categórica hierarquizada, mas sim da apropriação de uma terminologia consolidada para fins de padronização descritiva dos registros em campo.

As informações obtidas foram registradas em fichas específicas de amostragem, detalhando a cobertura observada no entorno imediato de cada ponto, e estão organizadas e apresentadas no Apêndice A, servindo de base contextual para a interpretação dos dados físico-mecânicos analisados ao longo deste trabalho.

5.2.4. Determinação dos Indicadores de Erosão.

Durante as etapas de campo, uma inspeção visual minuciosa foi conduzida para identificar sinais de erosão (Figura 5.3). Uma análise detalhada do entorno de cada ponto amostrado foi realizada.

Utilizando os indicadores de erosão listados na Tabela 5.1, numerados de 1 a 11 conforme sua ordem de análise, registrou-se a presença de cada indicador sempre que a erosão foi identificada. Com base nas observações de campo realizadas em 65 pontos amostrados no município de Sorocaba, foi atribuída uma nota de intensidade de erosão para cada local. Essa nota foi definida segundo uma escala qualitativa de 1 a 5, em que 1 representa erosão leve e 5 representa erosão severa, de acordo com os sinais visuais observados. A classificação foi qualitativa, fundamentada na comparação entre os tipos e estágios dos processos erosivos identificados. Os

dados referentes aos indicadores de erosão, no entorno de cada ponto amostrado, foram registrados em uma ficha específica e estão apresentados no Apêndice A, Tabela A.1.



Figura 5.3. Ilustração de exposição de perfil de solo com feições indicativas de erosão laminar e escorregamento superficial. Fonte: autora. Data: 21 jul. 2022.

Tabela 5.1. Indicadores de erosão e sua descrição, adaptado de Okoba e Sterk (2006).

<i>Número</i>	<i>Indicadores de erosão</i>	<i>Breve Descrição</i>
1	Pedestais de salpicamento	Descreve crateras criadas pelas gotas de chuva e coluna de solos protegidas por rochas, raízes ou resíduos de culturas. Comumente encontradas embaixo ou fora da copa das árvores.
2	Lavagem de camada	Marcada pelo caminho deixado pelo fluxo de escoamento em superfícies que mostra a direção do fluxo.
3	Ravinas	Canais contínuos ou descontínuos. Desenvolvimento após intensos episódios de chuva, começando de uma curta distância do cume ou base de uma planta, devido às estruturas da folha que concentram e interceptam nas copas a água da chuva.
4	Raízes expostas	Exposição de raízes aéreas depois que a camada superficial do solo é removida pelo escoamento e salpicamento das gotas de chuva no solo. Indica que a superfície do solo foi removida enfraquecendo a estabilidade das culturas.
5	Sedimentação	Identificada pelo soterramento de culturas/gramíneas ou deposição de um “novo solo”. Marcada por área fértil ou infértil. O material solo pode ser rico em nutrientes ou depósito grosseiro de areia/pedregulho.
6	Rompimento de estruturas ligadas à conservação do solo	Marcado por lacunas em faixas contínuas de estruturas de conservação. Revela escoamento excessivo que pode não ser contido pelas estruturas existentes.
7	Pedregosidade	Pequenas pedras soltas depositadas na superfície do solo. Sobrepondo camadas superficiais e subsuperficiais de solo removidos por erosão hídrica.
8	Afloramentos rochosos	Rochas parcialmente expostas. Indica que os solos são rasos e lavados pelo fluxo de escoamento, expondo a rocha-mãe.
9	Voçorocas	Maiores que ravinas e se distinguem das mesmas quando uma criança de 7 anos de idade não consegue atravessá-la.
10	Solos vermelhos	Solos escuros superficiais são removidos pelo escoamento. Forte indicador de solos improdutivos e severamente erodidos.
11	Solos soltos	Solos propensos à erosão eólica e facilmente levados por água de enxurrada. Eles não são escuros ou vermelhos, mas possuem pouca capacidade de retenção de água. Eles não ocupam grandes áreas uma vez que são intercalados entre solos vermelhos ou escuros.

Com base na quantificação dos indicadores visuais de erosão registrados nos 65 pontos amostrados, foi elaborada uma escala de intensidade variando de 1 (muito baixa) a 5 (muito alta). Essa classificação considerou a quantidade de diferentes tipos de processos erosivos observados por ponto, conforme definido em protocolo de campo.

5.2.5. Determinação da Profundidade de Penetração do Penetrômetro.

Para a determinação da resistência do solo, foram realizados ensaios utilizando um penetrômetro de impacto. O penetrômetro de impacto é amplamente utilizado para medir a resistência do solo à penetração, fornecendo dados importantes sobre sua compactação. Este instrumento dinâmico utiliza uma massa de 4 kg que, ao ser liberada de uma altura de 40 cm, impacta uma haste com ponteira cônica, penetrando no solo.

O procedimento, portanto, consistiu em inserir o penetrômetro verticalmente na superfície do solo e aplicar três golpes em cada ponto de medição. Após essa etapa, foi realizada a leitura da profundidade de penetração da haste por meio da régua graduada presente no equipamento. Essa medição permitiu obter dados sobre o deslocamento da haste após os impactos, indicando a resistência do solo à penetração, que é normalmente expressa em impactos por decímetro (impactos/dm). Os dados referentes à resistência do solo à penetração foram registrados em uma ficha específica e estão apresentados no Apêndice A, Tabela A.1.

No laboratório, as amostras de solo foram submetidas a diversas análises para a determinação da densidade, cor, teor de umidade, composição granulométrica, limites de consistência, carbono orgânico e erodibilidade.

5.3. Análises Laboratoriais Geotécnicas.

5.3.1. Determinação da Densidade do solo.

A determinação da densidade do solo normalmente é realizada por um método direto, denominado Método do Cilindro Volumétrico. Esse método é baseado no procedimento descrito na ISO (2017).

Porém, para determinar a densidade do solo, de forma experimental, foram utilizados anéis rígidos de Polietileno Tereftalato (PET), com volume de 6,5 cm³ e massa de 2,1 g (valores médios), que foram cravadas, com o auxílio de um martelo, diretamente no solo natural. Quando o solo apresentava rigidez elevada, optou-se por cilindros metálicos, com volume de 11,4 cm³ e massa de 9 g (valores médios).

Após a cravação, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetadas e transportadas ao laboratório. No laboratório, as amostras foram submetidas à secagem em estufa, a uma temperatura de 105°C, por 24 horas. Após, foi determinada a massa do solo junto com a tampa ou o cilindro em uma balança analítica. A massa do recipiente vazio, previamente obtida, foi subtraída da massa total, resultando na massa do solo. A densidade do solo (USDA, 2008) foi então calculada dividindo-se essa massa pelo volume conhecido do recipiente ou volume do solo (Equação 5.1), dada em g.cm⁻³.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (5.1)$$

Onde:

ρ = densidade do solo (g.cm⁻³).

M = massa do solo (g).

V = volume do solo (cm³).

5.3.2. Determinação da Cor do solo.

A identificação da cor do solo com base no sistema de Munsell (MUNSELL, 1905) é uma etapa importante nas análises morfológicas, uma vez que a coloração pode indicar aspectos relevantes da composição e do estado físico-químico do material. Utilizando-se da Carta de Cores, foi possível classificar visualmente as amostras por meio de comparações diretas sob iluminação natural. Essa carta é composta por páginas organizadas segundo três parâmetros: matiz, que se refere à tonalidade predominante (como vermelha ou amarelada); valor, que expressa o grau de claridade; e croma, que representa a saturação da cor.

O procedimento consistiu em confrontar cada amostra úmida com os padrões contidos na carta até encontrar aquele que mais se aproximasse da coloração observada. O código identificado, por sua vez, foi registrado para caracterizar a cor do solo de forma objetiva, conforme o sistema padronizado proposto por Munsell (1905).

5.3.3. Determinação do Teor de Umidade do solo.

O Teor de umidade foi determinado conforme Caputo e Caputo (2016). A caracterização da umidade em um solo implica na relação entre a massa da água presente em um determinado volume de solo e a massa da parte sólida nesse mesmo volume, expressa em porcentagem. A obtenção desse parâmetro é um procedimento direto, que requer a determinação da massa da amostra em seu estado natural, inserida em uma placa de Petri sem a perda da umidade durante a análise, e a massa após a secagem completa em uma estufa a 105-110°C. O teor de umidade é obtido através da relação entre a massa da água e a massa de sólidos (Equação 5.2), em porcentagem.

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (5.2)$$

Onde:

w = teor de umidade (%).

M_w = massa da água (g).

M_s = massa de sólidos (g).

5.3.4. Determinação da Granulometria do solo.

A medida do tamanho das partículas constituintes de um solo foi realizada pelo método descrito por Camargo et al. (2009), no Boletim Técnico do Instituto Agronômico de Campinas. De forma geral, a análise granulométrica envolve a coleta de uma amostra de solo representativa, sua preparação, o peneiramento para separar as partículas de diferentes tamanhos, a determinação do teor de areia retida nas peneiras, a sedimentação para separar as frações de silte e argila, a análise

do teor dessas frações e o cálculo dos percentuais das classes texturais do solo em relação à massa inicial da amostra.

5.3.4.1. Preparo da Amostra de solo.

Inicialmente, a amostra de solo foi seca em estufa a uma temperatura máxima de 40°C, por 24 horas. Após a secagem, foram cuidadosamente removidos os materiais indesejáveis, como galhos, folhas e raízes. Em seguida, a amostra foi quarteada para garantir a sua homogeneidade.

5.3.4.2. Ensaio de Peneiramento.

O solo foi colocado em um conjunto de peneiras, no agitador de peneiras granulométricas, com aberturas de malha de 2 mm, 0,212 mm e fundo. O conjunto de peneiras foi agitado por 5 minutos para permitir a separação das partículas de acordo com o tamanho dos grãos. Após o peneiramento, foram determinadas as massas das frações grossas de solo retidas em cada peneira, através de uma balança semi-analítica. A porcentagem de cada fração (areia grossa, areia média e areia fina) retida nas peneiras em relação à massa total da amostra foi obtida.

5.3.4.3. Ensaio de Sedimentação.

Para a realização do método da pipeta, foram transferidos 10 g da amostra de solo para um frasco de dispersão, juntamente com 50 ml da solução dispersante composta por hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio dissolvidos em água destilada. A mistura foi submetida a agitação a 30 rpm durante dezesseis horas para garantir a completa dispersão das partículas de solo (Figura 5.4). Após essa etapa, a suspensão foi transferida para uma proveta de 500 ml, sendo então passada por peneiras com malhas de 0,2 mm ou 0,053 mm, conforme o tipo de análise. O volume da proveta foi completado com água destilada.



Figura 5.4. Agitador mecânico utilizado no preparo das amostras para o Ensaio de Sedimentação.

Fonte: autora. Data: 02 nov. 2022.

Após completar o volume da proveta (Figura 5.5), a suspensão foi agitada durante trinta segundos com um bastão contendo um êmbolo de borracha na extremidade, realizando movimentos de cima para baixo para homogeneizar a mistura. Em seguida, foi anotado o tempo (Tabela 5.2) para permitir a sedimentação das partículas de acordo com a lei de Stokes (STOKES, 1851).

A coleta das alíquotas foi feita com uma pipeta de 10 ml, sendo a profundidade de 10 cm utilizada para amostragem de argila mais silte e a profundidade de 5 cm para a amostragem de argila. A pipeta foi utilizada com sucção contínua para evitar turbilhonamento. As alíquotas coletadas foram transferidas para cápsulas de porcelana previamente taradas e secas a 105-110°C por, no mínimo, oito horas.

Após a secagem, as cápsulas foram retiradas da estufa, resfriadas em dessecador com cloreto de cálcio anidro e pesadas rapidamente em balança com precisão de décimo milésimo de grama. A massa das amostras permitiu calcular as porcentagens das frações de silte e argila seca ao ar. Para garantir a precisão dos resultados, o procedimento foi repetido com uma amostra em branco, contendo apenas a solução dispersante e água destilada.



Figura 5.5. Análise granulométrica por sedimentação em provetas graduadas.

Fonte: autora. Data: 02 nov. 2022.

Tabela 5.2. Tempo necessário, a diferentes temperaturas; para sedimentação de partículas de solo com peso específico de 2,65. Para a argila ($d < 0,002\text{mm}$), considerou-se uma profundidade de 5 cm e para a argila+silte ($< 0,02\text{mm}$) de 10 cm (¹).

<i>Temp. (°C)</i>	<i>Argila (5 cm)</i>	<i>Argila+Silte (10 cm)</i>
10	5h 13min	6h 14min
11	5h 05min	6h 03min
12	4h 55min	5h 54min
13	4h 48min	5h 44min
14	4h 40min	5h 35min
15	4h 33min	5h 27min
16	4h 25min	5h 19min
17	4h 18min	5h 10min
18	4h 13min	5h 03min
19	4h 05min	4h 55min
20	4h 00min	4h 48min
21	3h 55min	4h 41min
22	3h 50min	4h 34min
23	3h 43min	4h 28min
24	3h 38min	4h 22min
25	3h 33min	4h 15min
26	3h 28min	4h 10min
27	3h 23min	4h 04min
28	3h 20min	3h 59min
29	3h 15min	3h 54min

Após a determinação das porcentagens das frações de areia, silte e argila, o solo foi classificado em relação à sua textura utilizando o triângulo textural (Figura 5.6).

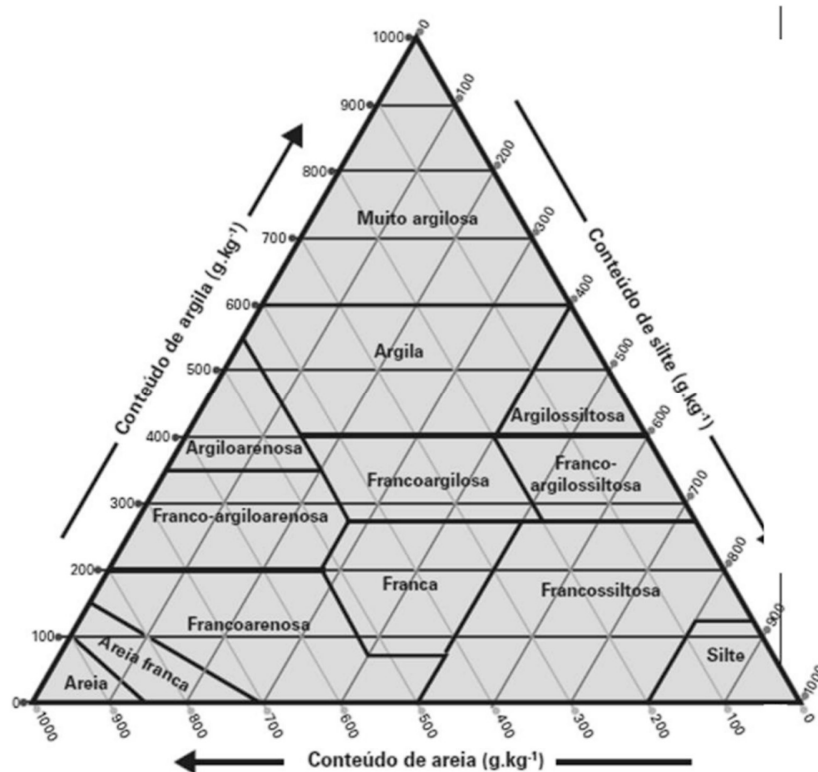


Figura 5.6. Triângulo textural utilizado para identificar as classes texturais do solo.

Fonte: IBGE (2015).

5.3.5. Limites de Consistência do solo.

Os Limites de Consistência ou Limites de Atterberg (MASSAD, 2016) são o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade. Foram obtidos de acordo com Camargo et al. (2009), através do Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de Campinas.

5.3.5.1. Preparo da Amostra de solo.

Para a realização dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), foi utilizada uma amostra seca ao ar de aproximadamente 200 g, a qual foi peneirada na malha #40, com abertura de 0,42 mm, assegurando a uniformidade adequada para a execução dos testes.

5.3.5.2. Determinação do Limite de Liquidez do solo.

O procedimento para a determinação do Limite de Liquidez, adaptado por Casagrande (CASAGRANDE, 1948), foi realizado utilizando um dispositivo conhecido como Aparelho de Casagrande. O processo foi iniciado com a limpeza cuidadosa da concha do aparelho de Casagrande, verificando se estava ajustada para uma queda de 1 cm. Em seguida, misturou-se a amostra com água destilada para conferir a consistência ao solo. Um volume do solo foi colocado na concha, e a superfície foi nivelada com a frente da concha. Foi feito um corte com o bisel do aparelho, seguido pela rotação da manivela a duas voltas por segundo.

Registrou-se o número de golpes necessários para unir o solo no fundo da cuba. Cerca de 10 g do solo que aderiu devido às pancadas foram removidos e pesados. Após secagem em estufa a 105-110°C, a massa foi novamente determinada, calculando-se em seguida a porcentagem de água na amostra. Água foi adicionada e a pasta foi manipulada um pouco mais, e um novo volume de amostra foi colocado na concha, repetindo todos os passos até a obtenção de uma nova porcentagem de umidade. Três determinações de umidade foram realizadas, distribuindo-se acima e abaixo de 25 golpes, o número exigido para o Limite de Liquidez. O teor de umidade foi expresso em termos percentuais, correspondente à quantidade de 25 golpes necessários para fechar uma fissura de aproximadamente 1 cm de comprimento.

5.3.5.3. Determinação do Limite de Plasticidade do solo.

No processo, retirou-se uma amostra utilizada na determinação do Limite de Liquidez. Formou-se uma bola, pressionando-a contra uma placa de vidro. Uma subamostra foi retirada, dando origem a um bastonete cilíndrico de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, curvando-o até as pontas se tocarem, sem que houvesse fragmentação, e sua umidade foi determinada a 105-

110°C. A amostra restante foi manipulada para perder água. Em seguida, outro bastonete foi criado, o qual, ao ser curvado como o anterior, apenas se trincou, e sua umidade foi determinada. Finalmente, o restante da amostra foi trabalhado de modo a possibilitar a formação de um bastonete que se rompesse quando manipulado como os anteriores. A umidade desse último bastonete foi então determinada. O Limite de plasticidade foi definido como a média aritmética dos teores de umidade obtidos em ensaio, considerando 5% de desvio padrão. O Índice de Plasticidade é dado pela subtração entre LP e LL.

5.4. Análises Laboratoriais Eco-Hidrológicas.

5.4.1. Determinação do Carbono Orgânico Total do solo.

Conforme especificado pela ABNT (2017), a amostra de solo foi inicialmente submetida a uma secagem completa em estufa a 60°C por 72 horas. Após essa etapa, cerca de 20 g da amostra seca foram pesados em um cadinho de porcelana, registrando-se essa medida como a massa seca inicial.

Posteriormente, o cadinho com a amostra seca foi inserido em uma mufla a 440°C por 3 horas para a calcinação, visando a completa oxidação da matéria orgânica presente na amostra, transformando-a em cinzas. Após o processo de calcinação, o cadinho foi retirado da mufla, permitido esfriar até atingir a temperatura ambiente e então pesado novamente, registrando-se essa medida como a massa calcinada final. Para calcular a porcentagem de matéria orgânica, utilizou-se a Equação 5.3.

$$\text{Teor de matéria orgânica} = \frac{\text{massa calcinada} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \quad (5.3)$$

Em seguida, para determinar o carbono orgânico total do solo, aplicou-se a Equação 5.4:

$$\text{COT} = \frac{\text{Teor de matéria orgânica}}{1,724} \quad (5.4)$$

Esse cálculo (Equação 5.4) baseia-se no fator de Van Bemmelen, que assume que a matéria orgânica do solo contém aproximadamente 58% de carbono (SILVA et al., 2023).

O método destaca-se por ser simples e preciso na análise do carbono orgânico presente nos solos. Sua aplicação tem papel fundamental em pesquisas sobre os ciclos de carbono e na análise da qualidade do solo.

5.4.2. Determinação do Índice de Erodibilidade do solo.

O método de determinação da erodibilidade do solo que será adotado utilizará o modelo EPIC (Environmental Policy Integrated Climate). Este modelo foi desenvolvido com o objetivo de analisar a relação entre a erosão do solo e sua produtividade, conforme descrito por WILLIAMS, RENARD e DYKE (1983). O EPIC inclui diversos componentes físicos que abrangem aspectos como hidrologia, dinâmica de nutrientes, crescimento de plantas, temperatura do solo, preparo do solo e fatores econômicos.

A estimativa da erosão hídrica do solo no modelo EPIC baseia-se na Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978), utilizando a multiplicação dos seis fatores estabelecidos por esta equação, além de considerar o fator de fragmentos grosseiros. A erodibilidade do solo (K_{EPIC}) é determinada pela relação entre o tamanho das partículas do solo e o teor de carbono orgânico, de acordo com a Equação 5.5.

$$K_{EPIC} = \left(0,2 + 0,3e^{\left(-0,0256SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right)} \right) \times \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0,3} \times \left(1 - \left(\frac{0,25COT}{COT + e^{(3,72 - 2,95COT)}} \right) \right) \times \left(1 - \frac{0,7SN}{SN + e^{(-5,51 + 22,9SN)}} \right) \times 0,1317 \quad (5.5)$$

Onde:

K_{EPIC} = erodibilidade do solo ($t \, ha \, h \, ha^{-1} \, MJ^{-1} \, mm^{-1}$);

CLA = teor da fração de argila ($< 0,002 \, mm$) (%);

SIL = teor da fração de silte ($0,002 - 0,05 \, mm$) (%);

SAN = teor da fração de areia ($0,05 - 2,0 \, mm$) (%);

COT = carbono orgânico total do solo (%);

$SN = 1 - \frac{SAN}{100}$;

Fator de conversão da unidade métrica para o SI = 0,1317.

Os dados de entrada referentes à textura e ao carbono orgânico do solo já foram obtidos pelos ensaios de granulometria (Apêndice A, Tabelas A.2 e A.3) e carbono orgânico total (Apêndice A, Tabela A.4) para as amostras de solo. Para assegurar a consistência dos resultados, os dados de entrada do EPIC seguirão as mesmas metodologias usadas no nomógrafo da USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978). O teor de carbono orgânico será limitado a 1,724, conforme estabelecido pelo fator de Van Bemmelen, mencionado em Minasny et al. (2020). Esse fator pressupõe que a matéria orgânica do solo contém aproximadamente 58% de carbono, sendo amplamente utilizado para converter o teor de matéria orgânica no teor de carbono orgânico, auxiliando na compreensão da dinâmica de carbono nos solos. Além disso, a fração de areia muito fina será adicionada à fração de silte, seguindo as recomendações de Panagos et al. (2014).

Este procedimento metodológico proporciona uma avaliação detalhada e precisa da erodibilidade do solo, facilitando a compreensão das dinâmicas de erosão e auxiliando na formulação de estratégias eficazes para o manejo e a conservação do solo.

5.5. Modelos Estatísticos de Caracterização Geotécnica e Eco-Hidrológica do solo.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software BioEstat 5.3 (AYRES et al., 2007), uma ferramenta frequentemente empregada em pesquisas científicas por possuir uma diversidade de testes estatísticos, tanto métodos paramétricos quanto não paramétricos. O BioEstat 5.3 possui uma interface simples, o que facilita a aplicação de diversos testes estatísticos, como a Estatística Descritiva, o Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952), a correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904) e a análise de regressão. Essa característica contribuiu para a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis.

5.5.1. Estatística descritiva da granulometria do solo.

Para descrever as porcentagens dos diferentes tipos de solo com base na análise granulométrica, foi realizada uma estatística descritiva para as amostras dos horizontes superficial e subsuperficial. As frações analisadas foram Areia Grossa e Média, Areia Fina, Silte e Argila. As

medidas descritivas utilizadas incluíram Tamanho da Amostra, Mínimo (%), Máximo (%), Amplitude Total (%), Mediana (%), Média Aritmética (%) e Coeficiente de Variação (%).

O Tamanho da Amostra foi considerado para indicar a quantidade de dados disponíveis para cada fração granulométrica. As medidas de Mínimo e Máximo foram aplicadas para identificar os valores mais baixos e mais altos observados nas porcentagens de cada tipo de solo, enquanto a Amplitude Total mostrou a diferença entre esses valores, indicando a variação presente nas amostras.

A Mediana foi utilizada para representar o valor central das porcentagens, reduzindo a influência de possíveis valores extremos. A Média Aritmética permitiu calcular um valor médio das porcentagens para cada fração analisada. Já o Coeficiente de Variação (%) foi calculado para avaliar a dispersão dos dados em relação à média, indicando a variabilidade das amostras. Valores mais elevados desse coeficiente sugerem uma maior variabilidade nas porcentagens dos tipos de solo analisados.

5.5.2. Análise inferencial: Teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952).

Após análises prévias, para avaliar se há significância de diferenças entre os grupos Solo Superficial e Subsuperficial para as mesmas variáveis, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952), que é um método não paramétrico utilizado para comparar medianas de dois ou mais grupos independentes quando os dados não seguem uma distribuição normal. Foram analisadas as variáveis Densidade do solo, Teor de Umidade do solo, frações de Areia Grossa e Média, Areia Fina, Silte, Argila, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP). O teste buscou identificar se havia diferenças estatisticamente significativas nas medianas dessas variáveis entre os grupos avaliados. Para considerar as diferenças significativas, foi adotado o critério de $p < 0,05$, indicando que a probabilidade de as diferenças observadas terem ocorrido por acaso era inferior a 5%. Quando o valor de p foi menor que 0,05, considerou-se que havia diferenças significativas entre os grupos para as variáveis analisadas, sugerindo que os horizontes do solo apresentavam características distintas.

5.5.3. Coeficiente de Correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904).

Para verificar a correlação entre as variáveis analisadas, foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Spearman (ρ) (SPEARMAN, 1904), uma medida estatística não paramétrica adequada para avaliar relações monotônicas. A análise foi conduzida separadamente para os grupos de solo superficial e subsuperficial, considerando pares de variáveis cujos comportamentos pudessem estar associados.

No grupo Solo Superficial, avaliaram-se as correlações entre as variáveis apresentadas na Quadro 5.1.

Quadro 5.1. Correlações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas no grupo Solo Superficial.

<i>Numeração</i>	<i>Correlações entre as Variáveis Analisadas</i>
1	Argila e Limite de Liquidez (LL)
2	Argila e Limite de Plasticidade (LP)
3	Argila e Areia
4	Argila e Carbono Orgânico Total (COT)
5	Argila e Erodibilidade do solo (K_{EPIC})
6	Silte e Limite de Liquidez (LL)
7	Silte e Limite de Plasticidade (LP)
8	Silte e Carbono Orgânico Total (COT)
9	Areia e Carbono Orgânico Total (COT)
10	Areia e Erodibilidade do solo (K_{EPIC})
11	Carbono Orgânico Total (COT) e Erodibilidade do solo (K_{EPIC})

As correlações entre as variáveis do grupo Solo Subsuperficial foram avaliadas conforme apresentado na Quadro 5.2.

Quadro 5.2. Correlações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas no grupo Solo Subsuperficial.

<i>Numeração</i>	<i>Correlações entre as Variáveis Analisadas</i>
1	Argila e Limite de Liquidez (LL)
2	Argila e Limite de Plasticidade (LP)
3	Argila e Areia
4	Silte e Limite de Liquidez (LL)
5	Silte e Limite de Plasticidade (LP)

Para determinar a significância estatística das correlações, foi adotado o critério de $p < 0,05$, indicando que a probabilidade de ocorrência ao acaso da associação observada era inferior a 5%. Além da significância estatística, foram considerados os valores do coeficiente ρ , interpretados quanto à força da correlação: valores próximos a zero indicam correlação fraca ou nula; valores próximos a ± 1 sugerem associação forte entre as variáveis.

A partir dessa análise, foi possível destacar as variáveis com maior relevância estatística e maior potencial de contribuição na explicação dos fenômenos observados, permitindo a seleção de parâmetros mais adequados para os modelos de regressão e, consequentemente, para o desenvolvimento de funções de pedotransferência consistentes com a realidade dos dados coletados.

5.5.4. Análise Discriminante Multivariada (ADM).

Para a análise da diferenciação entre os grupos de solos superficial e subsuperficial, foi utilizada a Análise Discriminante Multivariada (ADM), método estatístico multivariado amplamente empregado na distinção de grupos com base em variáveis quantitativas. Esta técnica permite verificar se as variáveis físico-hídricas e geotécnicas são eficazes na separação dos grupos definidos a priori, além de identificar quais variáveis contribuem mais para essa separação.

A ADM foi aplicada com base na densidade do solo e nas porcentagens de areia grossa e média, areia fina, silte e argila, de forma a avaliar a capacidade discriminante dessas variáveis na diferenciação dos horizontes superficial e subsuperficial. Os dados foram previamente padronizados e submetidos a testes de normalidade e homogeneidade de variâncias. Em seguida, a

matriz de variância-covariância foi utilizada para o cálculo das funções discriminantes, por meio do software BioEstat 5.3. O resultado foi interpretado a partir da visualização gráfica dos grupos no espaço discriminante, da acurácia da classificação e da significância estatística das funções geradas. A análise foi complementada pela verificação dos coeficientes canônicos e das correlações entre variáveis, contribuindo para a robustez da interpretação e para a validação dos resultados obtidos.

5.5.5. Regressões – Funções de Pedotransferência (FPTs).

As regressões testadas para o desenvolvimento das funções de pedotransferência (FPTs) incluíram os modelos linear, logarítmico, exponencial e geométrico. A regressão linear foi utilizada para avaliar relações diretas e proporcionais entre as variáveis independentes e dependentes, permitindo uma interpretação mais simples dos coeficientes estimados. A regressão logarítmica foi aplicada para modelar situações em que o impacto das variáveis independentes diminui à medida que seus valores aumentam, sendo útil para capturar efeitos decrescentes nas propriedades do solo. A regressão exponencial buscou descrever relações em que as variáveis apresentam crescimento ou decaimento acelerado, enquanto a regressão geométrica foi empregada para ajustar modelos com dados que seguem padrões de multiplicação ou proporções constantes.

No grupo Solo Superficial, foram analisadas as regressões entre as variáveis, conforme a Quadro 5.3.

Quadro 5.3. Relações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas do grupo Solo Superficial analisadas por regressão.

<i>Numeração</i>	<i>Relação entre as Variáveis Analisadas</i>
1	Argila e Limite de Liquidez (LL)
2	Argila e Limite de Plasticidade (LP)
3	Argila e Areia
4	Argila e Carbono Orgânico Total (COT)
5	Argila e Erodibilidade do solo (K_{EPIC})
6	Silte e Limite de Liquidez (LL)
7	Silte e Limite de Plasticidade (LP)
8	Silte e Carbono Orgânico Total (COT)
9	Areia e Carbono Orgânico Total (COT)
10	Areia e Erodibilidade do solo (K_{EPIC})
11	Carbono Orgânico Total (COT) e Erodibilidade do solo (K_{EPIC})

No grupo Solo Subsuperficial, foram consideradas as regressões entre as variáveis, conforme a Quadro 5.4.

Quadro 5.4. Relações entre variáveis geotécnicas e eco-hidrológicas do grupo Solo Subsuperficial analisadas por regressão.

<i>Numeração</i>	<i>Relação entre as Variáveis Analisadas</i>
1	Argila e Limite de Liquidez (LL)
2	Argila e Limite de Plasticidade (LP)
3	Argila e Areia
4	Silte e Limite de Liquidez (LL)
5	Silte e Limite de Plasticidade (LP)

A avaliação da qualidade dos ajustes foi realizada com base no coeficiente de determinação (R^2). Valores superiores a 0,85 foram considerados satisfatórios para a construção das funções de pedotransferência, pois indicam que uma proporção significativa da variabilidade da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes. Além disso, observou-se a aderência

visual dos pontos à linha de tendência, fator que contribuiu para confirmar a representatividade do modelo em relação aos dados observados. Esse critério foi adotado para selecionar os modelos mais robustos, com potencial de fornecer estimativas confiáveis das propriedades do solo com base em atributos de mais fácil obtenção.

5.5.6. Gradiente Textural – Variação da Textura do Solo entre Horizontes.

Para complementar a análise da distribuição das frações granulométricas ao longo dos perfis, foi calculado o gradiente textural entre os horizontes superficial e subsuperficial. O gradiente textural é definido como a razão entre a porcentagem média de uma fração granulométrica (tradicionalmente a argila) no horizonte subsuperficial e a média correspondente no horizonte superficial. Esta razão permite identificar a intensidade da variação textural com a profundidade, podendo indicar processos como eluviamiento e iluviamiento de partículas finas, compactação ou diferenciação pedogenética (PRADO; PRADO, 2022).

Embora o uso clássico do gradiente textural envolva a fração argila, nesta pesquisa o cálculo também foi estendido às frações de areia grossa e média, areia fina e silte, visando ampliar a interpretação sobre a evolução textural e os efeitos dessas frações no comportamento hidromecânico dos solos analisados.

Esse indicador foi utilizado para subsidiar a interpretação dos processos de formação do solo e para verificar a presença de horizontes texturais marcantes, com possíveis implicações na infiltração da água, estabilidade estrutural, retenção de umidade e suscetibilidade à erosão (PRADO; PRADO, 2022).

5.6. Modelagem Cartográfica de Caracterização do solo.

Uma vez que todos os pontos de coleta foram georreferenciados, foram gerados produtos cartográficos e realizadas operações de integração de dados. Essas etapas foram desenvolvidas em uma plataforma SIG, utilizando o software de georreferenciamento QGIS em sua versão 3.36.0 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2024).

Para representar espacialmente os resultados obtidos, os dados foram organizados e processados de duas formas distintas: como representação pontual e por meio de interpolação espacial.

Na primeira abordagem, os dados laboratoriais foram atribuídos diretamente aos pontos georreferenciados de coleta. As porcentagens de areia total, silte e argila foram vinculadas a cada ponto de amostragem e representadas graficamente no QGIS 3.36.0 por meio de simbologia graduada ou categorizada. Essa representação permitiu a visualização direta dos dados coletados, sem estimativas para as áreas entre os pontos, garantindo uma leitura fiel das características texturais observadas nos locais amostrados. Esse procedimento foi adotado para os mapas referentes às porcentagens de Areia total, Silte, Argila e Classificação textural, nos horizontes superficial e subsuperficial.

Na segunda abordagem, foi utilizada a técnica de interpolação espacial IDW (Inverse Distance Weighting), que estima valores para áreas não amostradas com base na influência de pontos vizinhos. Essa técnica foi aplicada para gerar superfícies contínuas a partir das porcentagens de Areia grossa e média, Areia fina, Silte e Argila, bem como dos Limites de Consistência (Limites de Plasticidade (LP), Limites de Liquidez (LL) e Índices de Plasticidade (IP)), Carbono Orgânico Total (COT), Erodibilidade (K_{EPIC}) e Erodibilidade (K_{EPIC}) x Silte (%), nos horizontes superficial e subsuperficial.

O método IDW foi escolhido por sua simplicidade, capacidade de gerar superfícies suaves e pela coerência com a distribuição dos dados, sendo configurado com resolução espacial de 10 metros. A interpolação foi realizada também no QGIS, com ajustes específicos de raio de influência e número de pontos vizinhos considerados, otimizando a precisão da representação espacial dos atributos analisados.

6. RESULTADOS.

Os resultados obtidos atestam o caráter inovador do projeto, com contribuições organizadas em dois eixos principais: o primeiro diz respeito ao desenvolvimento de uma metodologia integrativa entre parâmetros geotécnicos e eco-hidrológicos, o que permite uma análise interdisciplinar mais robusta e abrangente; o segundo refere-se à produção de dados numéricos e cartográficos aplicáveis tanto a projetos técnicos no setor da construção civil em Sorocaba quanto a investigações acadêmicas, incluindo a proposição de novos índices interpretativos voltados à avaliação da vulnerabilidade e da qualidade dos solos.

6.1. Caracterização Inicial: Observações de Campo e Parâmetros de Laboratório.

As coordenadas x e y dos pontos de coleta, informações sobre a cobertura do entorno, observações em campo, indicadores de erosão e os valores de resistência do solo, obtidos por meio de ensaios com o penetrômetro, estão detalhados na Tabela A.1. Os parâmetros físicos, mecânicos e geotécnicos referentes ao horizonte superficial são apresentados na Tabela A.2, enquanto os parâmetros correspondentes ao horizonte subsuperficial estão descritos na Tabela A.3. Por fim, os parâmetros hidrológicos e ecológicos relacionados ao horizonte superficial encontram-se detalhados na Tabela A.4, contendo as informações complementares necessárias à análise interpretativa.

Todas essas tabelas estão reunidas no Apêndice A, de forma a preservar a organização e facilitar a consulta detalhada dos dados utilizados nas análises.

6.2. Modelos Estatísticos de caracterização geotécnica, hidrológica e ecológica do solo.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 pode-se observar as medidas relativas à estatística descritiva das porcentagens de cada tipo de solo (análise granulométrica) para as amostras superficiais e subsuperficiais, respectivamente.

Tabela 6.1. Resultados estatísticos da análise granulométrica para o horizonte superficial.

<i>Medidas</i>	<i>Areia grossa e média</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
Tamanho da amostra (n)	65	65	65	65
Mínimo (%)	43,3	1,7	0,4	3,1
Máximo (%)	92,3	39,9	9,5	17,4
Amplitude Total (%)	49,0	38,2	9,1	14,3
Mediana (%)	72,4	14,7	3,0	8,9
Média Aritmética (%)	71,0	16,0	3,6	9,4
Coeficiente de Variação (%)	17,8	64,5	63,6	37,4

Tabela 6.2. Resultados estatísticos da análise granulométrica para o horizonte subsuperficial.

<i>Estatística Descritiva</i>	<i>Areia grossa e média</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
Tamanho da amostra (n)	64	64	64	64
Mínimo (%)	44,8	1,7	0,1	3,0
Máximo (%)	90,1	37,1	25,7	27,9
Amplitude Total (%)	45,3	35,4	25,6	24,9
Mediana (%)	70,1	12,7	2,2	11,0
Média Aritmética (%)	70,7	14,1	3,6	11,6
Coeficiente de Variação (%)	16,0	56,3	115,7	45,7

Analisando-se os valores (Tabelas 6.1 e 6.2), constata-se a semelhança dos resultados encontrados (tamanho da amostra, valor mínimo, valor máximo, amplitude total, mediana e média aritmética e do coeficiente de variação) no horizonte superficial e horizonte subsuperficial, para a areia grossa, média e fina, silte e argila. Com exceção, no horizonte subsuperficial, para silte e

argila, verifica-se que os valores de porcentagem máxima são maiores, em relação aos dados no horizonte superficial.

Pode-se observar, também, que para a areia grossa e média (horizonte superficial e horizonte subsuperficial), os coeficientes de variação são, relativamente, baixos, o que indica uma variabilidade pequena em relação ao valor médio. Já para a areia fina, silte (horizonte superficial) e argila, os coeficientes de variação são, intermediários. Porém, no silte, no horizonte subsuperficial, é apresentado um coeficiente de variação alto, indicando uma variabilidade grande em relação à média, ou seja, uma maior dispersão ou heterogeneidade nos valores obtidos.

A análise por meio do teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952) demonstrou que, para diversos parâmetros físicos, como a densidade, a composição granulométrica (incluindo as frações de areia grossa, média, areia fina e silte) e os índices de consistência (limite de liquidez e de plasticidade), não se observaram variações significativas entre os horizontes superficial e subsuperficial. Isso aponta para uma uniformidade desses atributos ao longo do perfil do solo, sugerindo que os processos que regem as propriedades edáficas atuam de forma constante.

Em contraste, ao se examinar os teores de umidade e a distribuição da fração argilosa, o teste evidenciou diferenças relevantes entre as camadas. O solo subsuperficial apresentou um teor de umidade consideravelmente maior, demonstrando uma variação na capacidade de retenção de água conforme a profundidade. De modo similar, a concentração de argila foi maior no horizonte mais profundo, indicando que a composição textural, nesse aspecto, varia significativamente.

Os resultados indicam que, embora alguns parâmetros físicos do solo sejam semelhantes ao longo do perfil, a umidade e a quantidade de argila variam consideravelmente entre os horizontes. Essa diferença é fundamental para compreender os processos que levam à erosão, pois pode afetar tanto a coesão dos agregados quanto a capacidade do solo em resistir ao desgaste. Além disso, essa variabilidade deve ser considerada no desenvolvimento de práticas de manejo que visem a conservação e a sustentabilidade dos solos.

O Gráfico 6.1 apresenta os resultados da análise discriminante multivariada aplicada às amostras de solo dos, horizonte superficial e subsuperficial, tendo como variáveis discriminantes as frações granulométricas de areia grossa e média, areia fina, silte, argila e a densidade do solo.

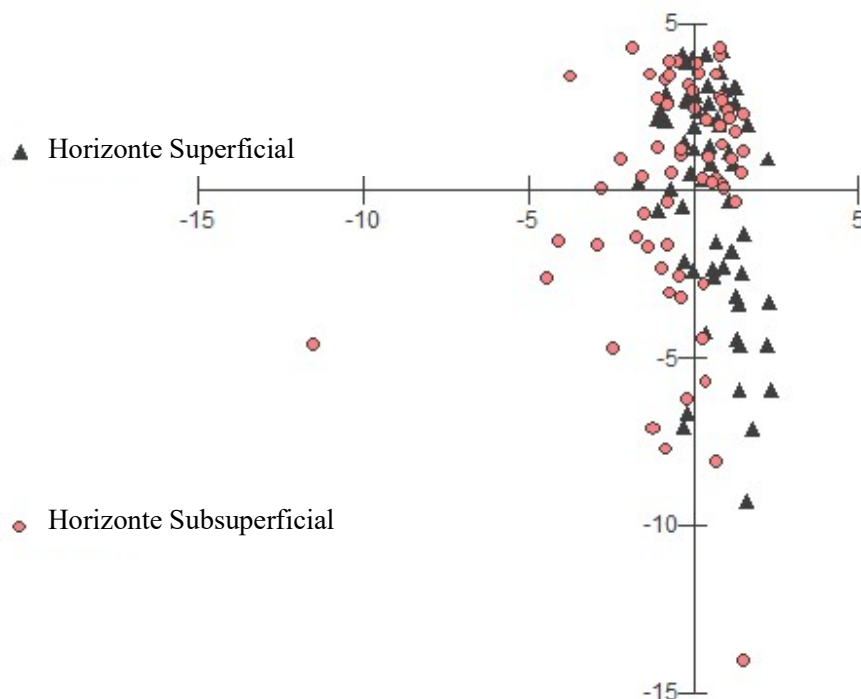


Gráfico 6.1. Distribuição das amostras de Solos Superficial e Subsuperficial com base na Análise Discriminante Multivariada (ADM) da Densidade do solo e das Porcentagens de Areia Grossa e Média, Areia Fina, Silte, Argila. Na figura os triângulos correspondem às amostras coletadas no horizonte superficial e os círculos correspondem às amostras coletadas no horizonte subsuperficial.

Os resultados, mostrados no Gráfico 6.1, refletem a aplicação da análise discriminante para comparar amostras de solo retiradas do horizonte superficial e subsuperficial. Os pontos representados são projeções das amostras em um espaço bidimensional definido pelas funções discriminantes geradas com base nas variáveis consideradas: densidade do solo, porcentagens de areia grossa e média, areia fina, silte, argila. O horizonte superficial do solo é representado por triângulos, enquanto o horizonte subsuperficial do solo é identificado por círculos.

No eixo horizontal ou primeiro componente discriminante, maior dispersão da amostra é notada no horizonte subsuperficial do solo, fornecendo pontos distribuídos em valores mais negativos, entre 0 e -5 e um ponto, entre -10 e -15. Tal dispersão implica que o solo subsuperficial exibe maior variabilidade em suas características quando comparado ao solo superficial, que mostra uma concentração maior de pontos na região central e, portanto, características mais

uniformes. Essa análise é limitada, pois apenas alguns pontos do horizonte subsuperficial do solo estão distribuídos ao longo desse eixo.

Visando aprofundar a interpretação dessas diferenças e investigar as possíveis relações entre as variáveis estudadas, foram realizadas análises de correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904) e modelos de regressão. Os dados utilizados para essas análises encontram-se organizados no Apêndice A (Tabelas A.2, A.3 e A.4), enquanto os Quadros 5.1 e 5.2 apresentam a organização das variáveis utilizadas nas correlações e regressões aplicadas. Esses testes foram realizados com o objetivo de identificar relações estatisticamente significativas entre propriedades geotécnicas e eco-hidrológicas dos solos, tanto nos horizontes superficiais quanto nos subsuperficiais. O foco foi entender se tais relações poderiam subsidiar a criação de funções de pedotransferência (FPTs), úteis para prever indiretamente atributos do solo. Para isso, os pares de variáveis foram organizados conforme o nível de significância ($p < 0,05$) e o poder de explicação (R^2), destacando os modelos com maior potencial preditivo.

Entre os resultados do horizonte superficial, a correlação mais significativa foi observada entre o teor de silte e o índice de erodibilidade (K_{EPIC}), com coeficiente de Spearman de 0,8056 ($p < 0,0001$; $n = 65$). Essa relação pode ser visualizada no Gráfico 6.2, que mostra a tendência linear entre o percentual de silte no eixo x e a erodibilidade do solo no eixo y, reforçando o papel do silte como um importante indicativo do comportamento hidromecânico do solo nesse horizonte.

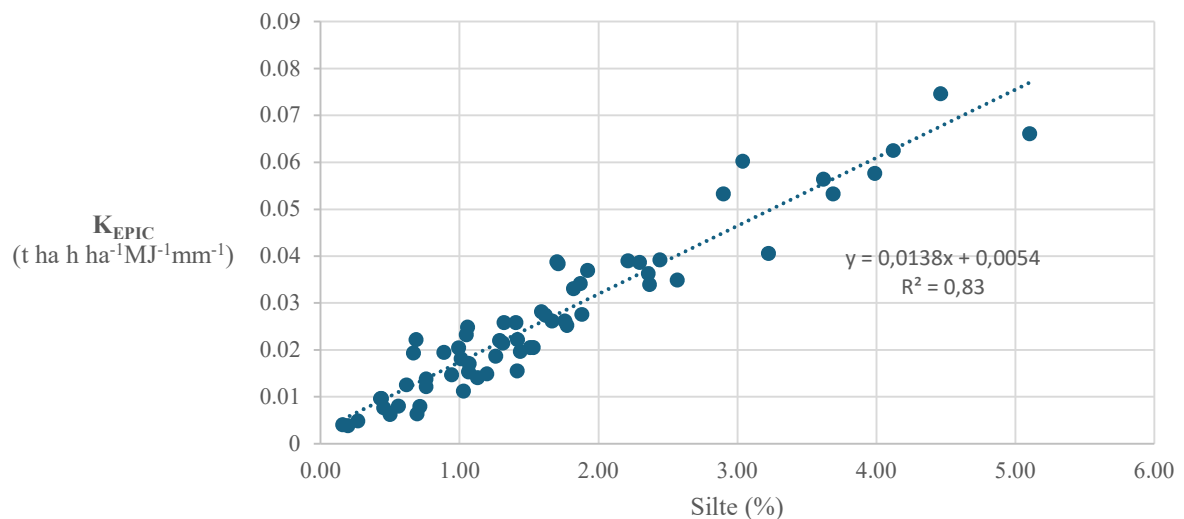


Gráfico 6.2. Relação entre o percentual de Silte e a Erodibilidade do solo (K_{EPIC}) no Horizonte Superficial obtida pela Regressão Linear.

No Gráfico 6.2, o ajuste da reta, feito pelo modelo linear, mostra a tendência de comportamento entre as variáveis. Os pontos estão dispersos ao redor e próximos da reta ajustada o que é indicativo de uma correlação forte. Conforme o percentual de silte aumenta, a erodibilidade do solo mostra um acréscimo de valores. Esse comportamento é mostrado pela reta ajustada que descreve uma relação direta entre as variáveis.

A regressão linear resultou em um R^2 elevado (83%), sendo definida a Equação 6.1.

$$K_{EPIC} = 0,0138 \times \text{Silte} + 0,0054 \quad (6.1)$$

A Equação 6.1 indica que o aumento no teor de silte tem impacto direto e considerável na erodibilidade do solo. Para cada 1% a mais de silte, estima-se um incremento de 0,0138 na erodibilidade ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$). O valor da constante (0,0054) representa a erodibilidade mínima projetada para solos com baixo conteúdo de silte. O alto R^2 reforça a robustez dessa FPT, sendo particularmente útil em solos arenosos de baixa coesão, onde o silte exerce papel determinante na desagregação e transporte de partículas.

As demais análises, para o horizonte superficial, apresentaram coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 80%, razão pela qual suas equações não foram consideradas apropriadas para formulação de FPTs. Apesar da significância estatística observada em alguns casos ($p < 0,05$), os baixos coeficientes de determinação indicam que as variáveis independentes analisadas explicam uma fração muito pequena da variabilidade nas variáveis dependentes. Consequentemente, tais modelos não são recomendados como funções de pedotransferência confiáveis. Nas Tabelas 6.3 e 6.4 são descritas essas análises com justificativas técnicas para a não adoção das equações.

Tabela 6.3. Parâmetros Estatísticos das relações entre propriedades Texturais, Índices de Consistência (LL e LP), Carbono Orgânico Total (COT) e Erodibilidade (K_{EPIC}), para o solo do horizonte superficial.

<i>Par de Variáveis</i>	<i>rs</i>	<i>p</i>	<i>R² (%)</i>	<i>Interpretação</i>
Argila e LL	-0,6184	<0,0001	33,20	Correlação inversa forte e significativa. R ² limitado, não recomendado como FPT.
Argila e LP	-0,4266	0,0084	16,98	Correlação moderada, mas baixa explicabilidade.
Argila e Areia	0,5126	<0,0001	27,69	Relação direta incomum. R ² baixo para FPT.
Argila e COT	-0,2125	0,0891	—	Correlação fraca e não significativa.
Silte e LL	0,0884	0,4875	—	Correlação muito fraca e não significativa.
Silte e LP	-0,1070	0,5285	—	Correlação muito fraca e não significativa.
Silte e COT	-0,0100	0,9371	—	Ausência total de correlação.
Areia e COT	-0,2723	0,0281	Baixo	Correlação fraca e R ² insuficiente para regressão.
Areia e K_{EPIC}	-0,2523	0,0425	—	Correlação fraca e explicabilidade insuficiente.
COT e K_{EPIC}	0,1191	0,3448	—	Correlação fraca e não significativa.

Para o horizonte subsuperficial, os resultados também demonstraram baixa capacidade preditiva, apesar de algumas correlações apresentarem significância estatística.

Tabela 6.4. Parâmetros Estatísticos das relações entre propriedades Texturais e Índices de Consistência (LL e LP), para o solo do horizonte subsuperficial.

<i>Par de Variáveis</i>	<i>rs</i>	<i>p</i>	<i>R² (%)</i>	<i>Interpretação</i>
Silte e LL	0,3459	0,0059	7,15	Correlação significativa, mas R ² muito baixo para FPT.
Silte e LP	0,4015	0,0092	10,64	Correlação significativa, porém, explicabilidade insuficiente.
Argila e Areia	0,5628	<0,0001	30,29	Correlação forte, mas R ² limitado para uso preditivo.
Argila e LL	-0,2280	0,0746	—	Correlação fraca e não significativa.
Argila e LP	-0,3047	0,0526	—	Correlação moderada, mas sem significância estatística.

Com base nessas observações, apenas a equação entre silte e erodibilidade (K_{EPIC}) no horizonte superficial foi considerada robusta o suficiente para aplicação prática como função de pedotransferência. As demais análises, embora relevantes para fins exploratórios, requerem validações adicionais e testes de acurácia antes de serem adotadas como modelos preditivos confiáveis.

Além dessas análises, aspectos relacionados à textura do solo também foram investigados. O gradiente textural foi determinado a partir da relação entre as médias aritméticas das porcentagens de cada fração granulométrica (areia grossa e média, areia fina, silte e argila) nos horizontes subsuperficial e superficial, conforme apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5. Gradiente textural das frações granulométricas do solo: relação entre as médias aritméticas das porcentagens no horizonte subsuperficial e no horizonte superficial.

<i>Frações texturais do solo</i>	<i>Gradiente textural</i>
Areia grossa e média	1,0
Areia fina	0,9
Silte	1,0
Argila	1,2

Os valores do gradiente textural representam as taxas de mudança na proporção de partículas de areia grossa, areia média, areia fina, silte e argila ao longo do perfil do solo, ou seja, indicam o quão rapidamente essas frações de partículas aumentam ou diminuem com a profundidade do solo.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6.5, os valores dos gradientes texturais para diferentes frações de partículas são: a areia grossa e média tem um valor de 1, a areia fina possui um valor de 0,9, o silte tem um valor de 1 e a argila possui um valor de 1,2. Esses valores indicam as taxas de mudança na proporção de cada fração de partículas ao longo do perfil do solo, sendo que valores maiores do que 1 indicam um aumento mais rápido com a profundidade.

Valor igual a 1,2 para o gradiente textural da fração argila é considerado significativo, pois indica uma alteração expressiva na textura entre o horizonte superficial e subsuperficial do solo. Esse aumento representa uma elevação de pelo menos 20% no teor de argila da camada subsuperficial em relação à camada superficial, sendo frequentemente associado a processos de iluviação, típicos de solos como Argissolos e Luvisolos (SANTOS et al., 2018). Essa transição textural tem implicações relevantes, como a limitação da percolação da água, o acúmulo hídrico na superfície, a restrição ao desenvolvimento radicular e o aumento da suscetibilidade à erosão.

De acordo com a EMBRAPA (2018), esse valor é utilizado como parâmetro taxonômico para o reconhecimento de horizontes B texturais no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, reforçando seu papel diagnóstico na Pedologia.

Embora o cálculo do gradiente textural ter sido estendido a outras frações granulométricas, como areia grossa e média, areia fina e silte, os valores obtidos para essas frações não apresentam a mesma relevância interpretativa. Isso ocorre porque tais componentes possuem menor influência direta sobre as propriedades físico-químicas e estruturais do solo, quando comparados à argila. Além disso, os gradientes texturais para essas frações não ultrapassaram o valor 1.

6.3. Mapeamento Geoespacial das Propriedades do Solo.

A análise geoespacial das propriedades físicas do solo possibilita a identificação de padrões de variabilidade espacial, essenciais para a compreensão do comportamento edáfico em diferentes profundidades e contextos ambientais. Por meio da interpolação dos dados obtidos em laboratório,

foi possível gerar mapas temáticos representando a distribuição das principais frações granulométricas e dos índices de consistência nos horizontes superficial e subsuperficial da área de estudo, localizada no município de Sorocaba (SP).

Na Figura 6.1 são apresentadas as porcentagens das classes texturais do solo, em vários pontos do horizonte superficial, do município de Sorocaba.

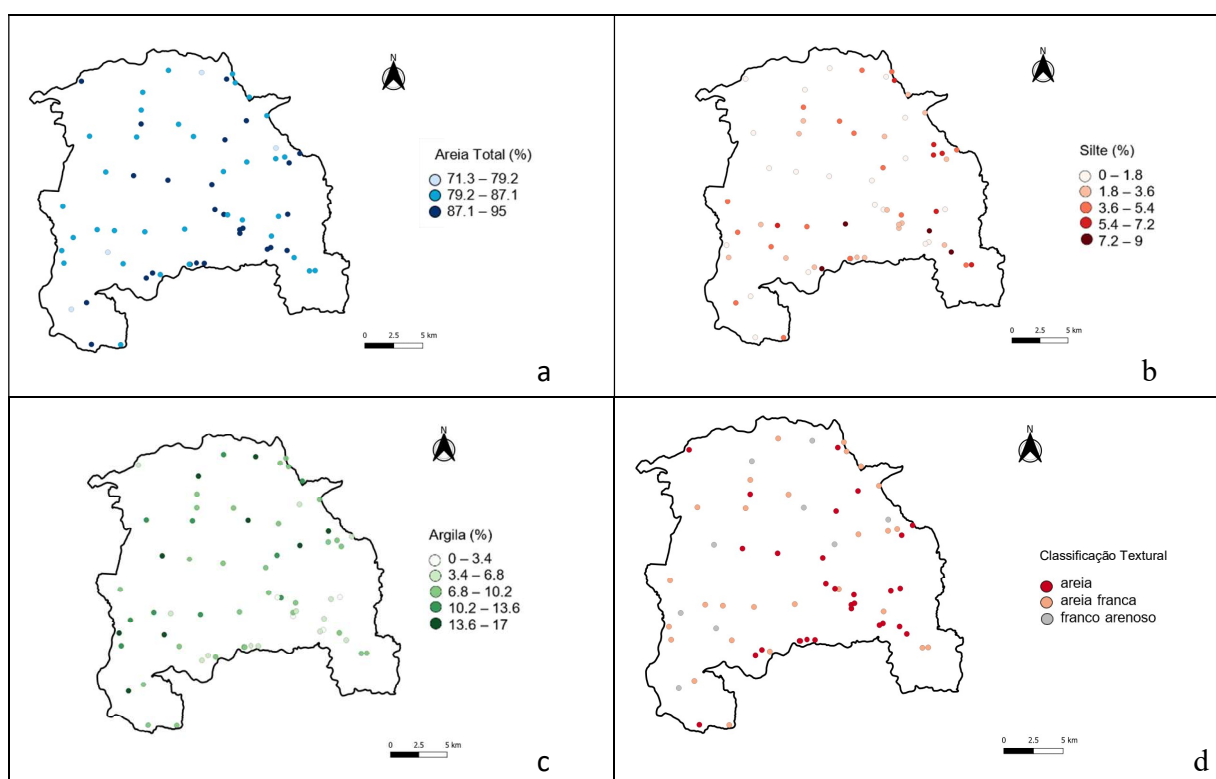


Figura 6.1. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte superficial. a) Areia total, b) Silte, c) Argila; d) Classificação Textural.

Na Figura 6.1a foram criados intervalos para a demonstração das variações das porcentagens de areia total, na Figura 6.1b, intervalos para as variações das porcentagens de silte e na Figura 6.1c, para as variações de porcentagens de argila, no município de Sorocaba.

As proporções de areia total, que incluem grãos com tamanhos entre 0,05 e 2,0 mm, variam em um intervalo total, de 77,1% a 95%, apresentando uma maior representatividade no intervalo entre 87,1% e 95%. As proporções de silte, compreendendo grãos com tamanhos entre 0,002 e 0,05 mm, variam de 0,4% a um máximo de 9%, demonstrando maior frequência no intervalo entre 1,8% e 3,6%. As proporções de argila, constituídas por grãos com diâmetros inferiores a 0,002 mm,

variam de 3,1% a um máximo de 17%, destacando-se uma maior expressividade no intervalo entre 6,8% e 10,2%. Os intervalos dos tamanhos de grãos, para areia total, silte e argila, foram considerados de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2013).

Observa-se a prevalência na porcentagem de areia total, em relação ao silte e argila.

Na Figura 6.1d, de acordo com a classificação textural, a areia encontra-se em abundância no horizonte superficial, seguida pela areia franca que, também, prevalece.

Locais classificados como textura franca também foram encontrados no trabalho de Scaglianti (2022), após analisar as características físicas dos solos do Parque Natural Municipal Corredores da Biodiversidade, localizado na região norte do município, confirmando, portanto, parte da base dos dados levantados no presente estudo.

Na Figura 6.2 são demonstradas as porcentagens das classes texturais do solo, nos diferentes pontos do horizonte subsuperficial, do município de Sorocaba.

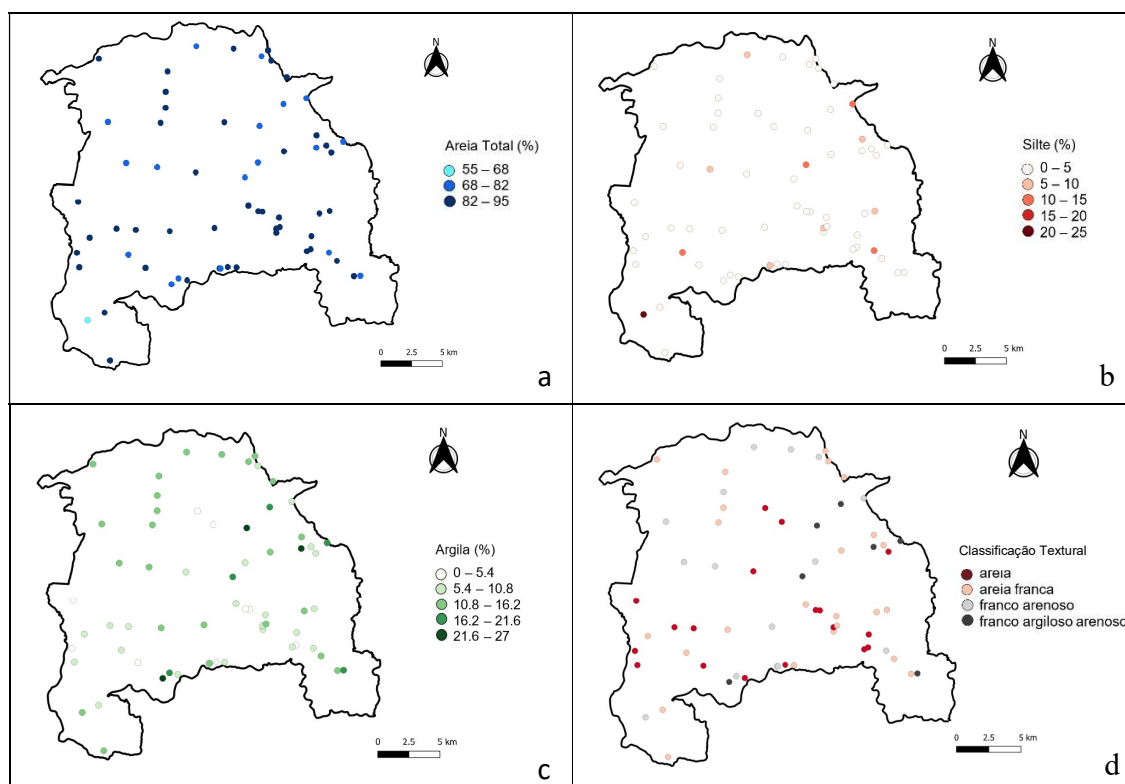


Figura 6.2. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte subsuperficial. a) Areia total, b) Silte, c) Argila; d) Classificação Textural.

Foram estabelecidos intervalos na Figura 6.2a para representar as variações das porcentagens de areia total, na Figura 6.2b, para as variações das porcentagens de silte e na Figura 6.2c, para as variações de porcentagens de argila, no horizonte subsuperficial do município de Sorocaba.

No que se refere à areia total, que abrange grãos com tamanhos entre 0,05 e 2,0 mm, as proporções variam de 59% a 95%, sendo mais comuns no intervalo entre 82% e 95%. Quanto ao silte, que compreende grãos com tamanhos entre 0,002 e 0,05 mm, as proporções variam de 0,1% a um máximo de 25%, com maior frequência no intervalo entre 0,1% e 5%. Por fim, as proporções de argila, que consistem em grãos com diâmetros inferiores a 0,002 mm, variam de 3% a um máximo de 27%, sendo mais expressivas no intervalo entre 5,4% e 10,8%. Os intervalos dos tamanhos de grãos, para areia total, silte e argila, foram considerados de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2013).

Os tamanhos de grãos, entre 0,05 e 2,0 mm, ou seja, areia total, são predominantes em relação ao silte e argila.

Conforme ilustrado na Figura 6.2d e de acordo com a classificação textural, pode-se observar que o solo predominante no horizonte subsuperficial é a areia franca.

Os mapas, demonstrados nas Figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6, foram gerados pelo interpolador Inverse of the Distance's Weight (IDW), com uma resolução espacial de 10 m.

Na Figura 6.3 são apresentados os mapas interpolados com a distribuição percentual das classes texturais do solo no horizonte superficial, na região de Sorocaba.

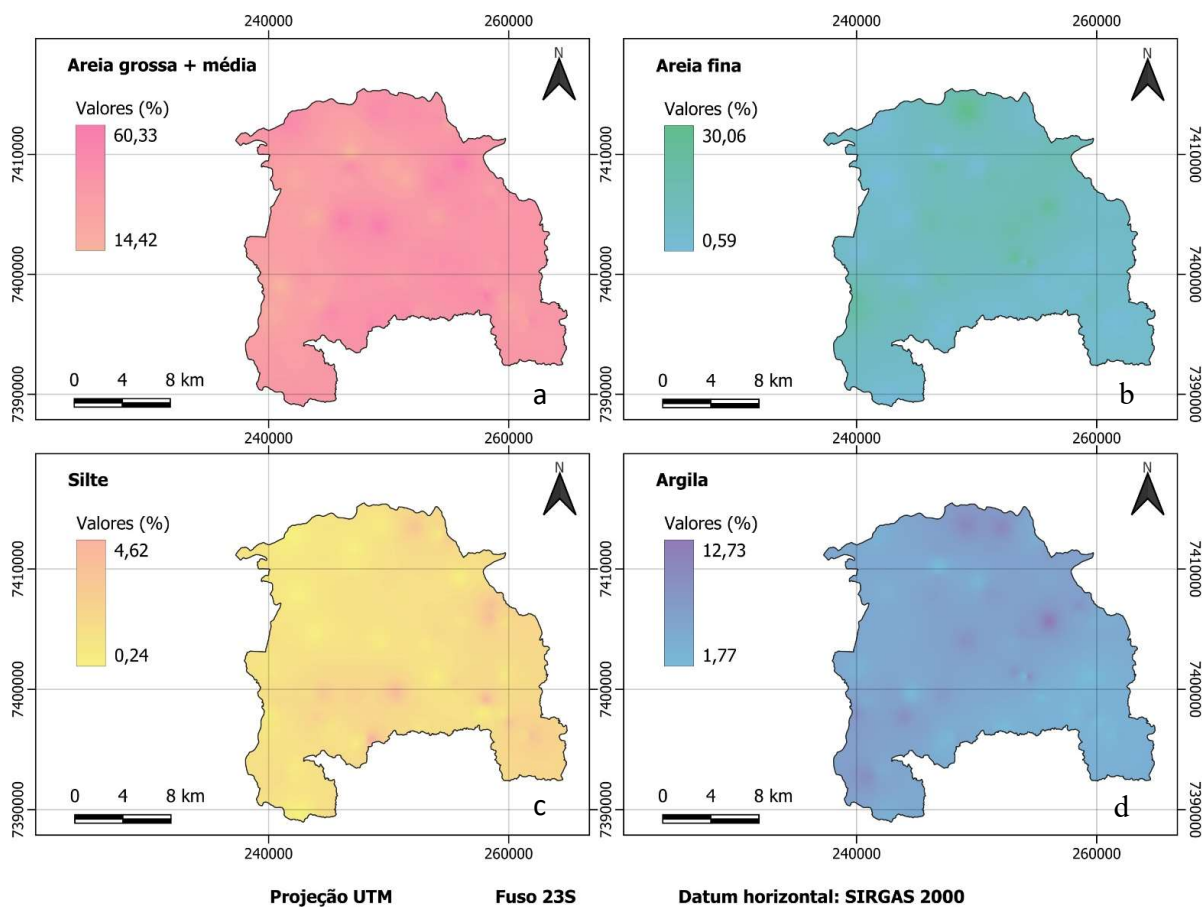


Figura 6.3. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte superficial (Mapa gerado por IDW). a) Areia grossa e média, b) Areia fina, c) Silte; d) Argila.

Na Figura 6.3a, foram estabelecidos intervalos para ilustrar as variações das porcentagens de areia grossa e areia média. Na Figura 6.3b, foram definidos intervalos para as variações das porcentagens de areia fina. Na Figura 6.3c, os intervalos foram criados para as variações das porcentagens de silte, enquanto na Figura 6.3d, foram estabelecidos para as variações das porcentagens de argila, no município de Sorocaba.

As proporções de areia grossa e média, abrangendo grãos com tamanhos entre 0,2 e 2,0 mm, variam de 14,42% a 60,33% dentro de um intervalo total. As proporções de areia fina, que compreendem grãos com tamanhos entre 0,05 e 0,2 mm, variam de 0,59% a um máximo de 30,06%. As proporções de silte, envolvendo grãos com tamanhos entre 0,002 e 0,05 mm, variam de 0,24% a um máximo de 4,62%. As proporções de argila, constituídas por grãos com diâmetros

inferiores a 0,002 mm, variam de 1,77% a um máximo de 12,73%. As classes de tamanhos de grãos para areia grossa e média, areia fina, silte e argila foram consideradas de acordo o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2013).

Os valores apontam para uma variação muito acentuada na relação entre as diferentes porcentagens dos vários tipos de partículas, para compor o solo, na área analisada. A presença significativa de areia grossa e média mostra que se trata de uma matriz com textura granular, o que pode ter alguma influência na permeabilidade e capacidade de suporte. Há uma variabilidade acentuada entre as porcentagens de areia fina, silte e argila, apontando para uma diversidade na variedade textural que pode comprometer a compactação e a resistência juntamente com a retenção de água. Dessa forma, os dados indicam uma composição heterogênea do solo, com possíveis implicações relevantes para o uso agrícola, para obras de infraestrutura e para o planejamento ambiental no município de Sorocaba.

Na Figura 6.4 são apresentados os mapas interpolados com a distribuição percentual das classes texturais do solo no horizonte subsuperficial, na região de Sorocaba.

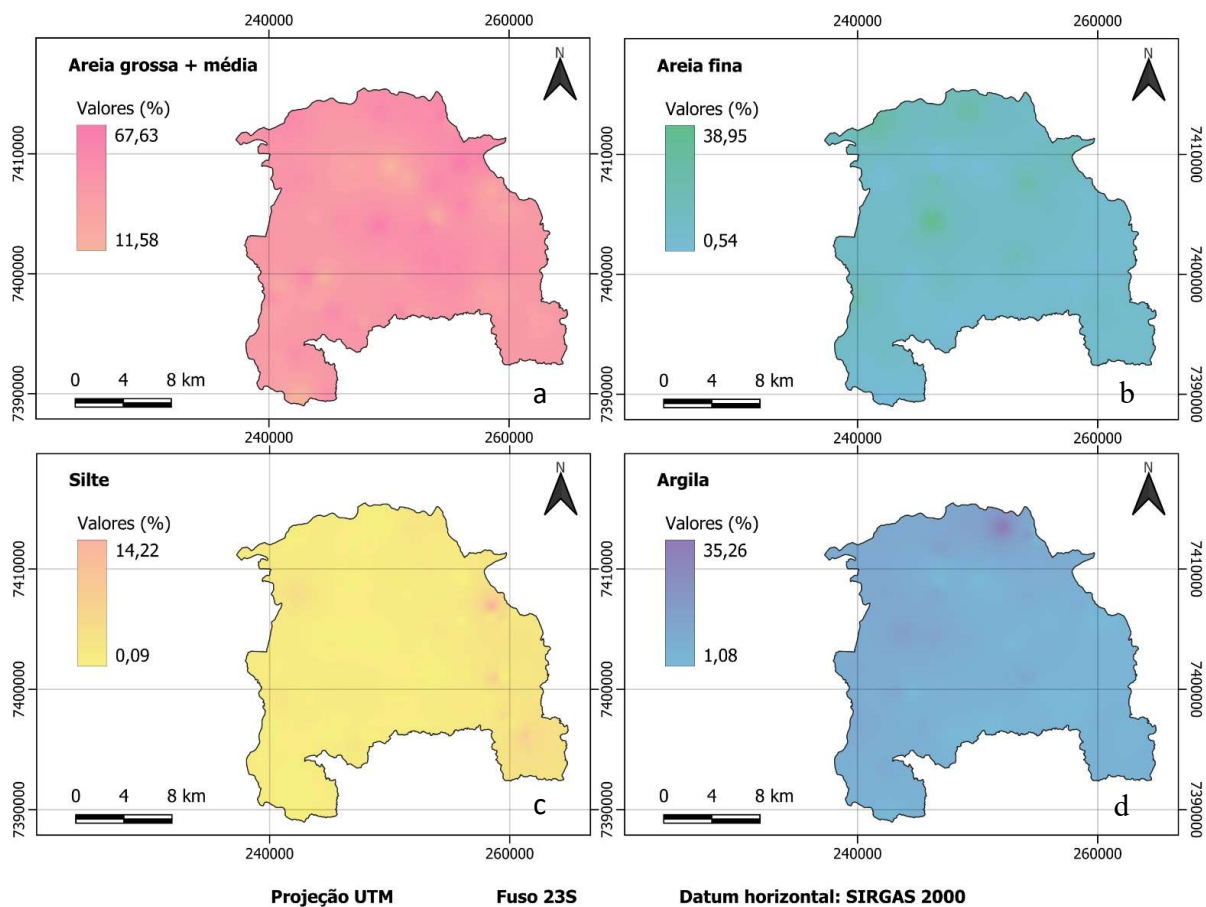


Figura 6.4. Porcentagens das classes texturais do solo para o horizonte subsuperficial (Mapa gerado por IDW). a) Areia grossa e média, b) Areia fina, c) Silte; d) Argila.

Observa-se, na Figura 6.4a, a distribuição da fração areia grossa e média (grãos com diâmetro entre 0,2 mm e 2,0 mm), cujos valores variam de 11,58% a 67,63%. A predominância dessa fração sugere solos com maior porosidade, baixa coesão e menor suscetibilidade à compactação, características relevantes para sua capacidade de suporte e drenagem. Na Figura 6.4b, a areia fina (0,05 mm a 0,2 mm) apresenta valores que variam de 0,54% a 38,95%, indicando uma maior heterogeneidade em pontos específicos da área. A presença mais expressiva dessa fração em algumas regiões pode influenciar a capacidade de retenção de água e, por consequência, a fertilidade e o manejo do solo. A Figura 6.4c mostra a distribuição do silte (partículas com diâmetro entre 0,002 mm e 0,05 mm), cujos valores variam entre 0,09% e 14,22%. Embora moderado, o teor de silte pode impactar tanto a drenagem quanto a compactação do solo, afetando

diretamente seu comportamento mecânico e hidráulico. Na Figura 6.4d, a fração argila (diâmetro inferior a 0,002 mm) varia de 1,08% a 35,26%, indicando a presença significativa dessa fração em algumas regiões. A argila confere ao solo maior coesão e plasticidade, podendo dificultar o manejo mecânico e favorecer processos erosivos em determinadas condições.

Os limites granulométricos considerados para cada fração textural (areia, silte e argila) estão de acordo com as definições do Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2013). A análise conjunta desses mapas revela uma elevada variabilidade espacial da composição textural, refletindo a heterogeneidade dos solos da área estudada. Essa diversidade influencia diretamente atributos como a compactação, a permeabilidade e a retenção hídrica, com importantes implicações para o uso agrícola, construção civil e conservação ambiental.

Na Figura 6.5 são apresentados os mapas gerados após a interpolação considerando a distribuição percentual dos Limites de Consistência do solo para o horizonte superficial, na região de Sorocaba.

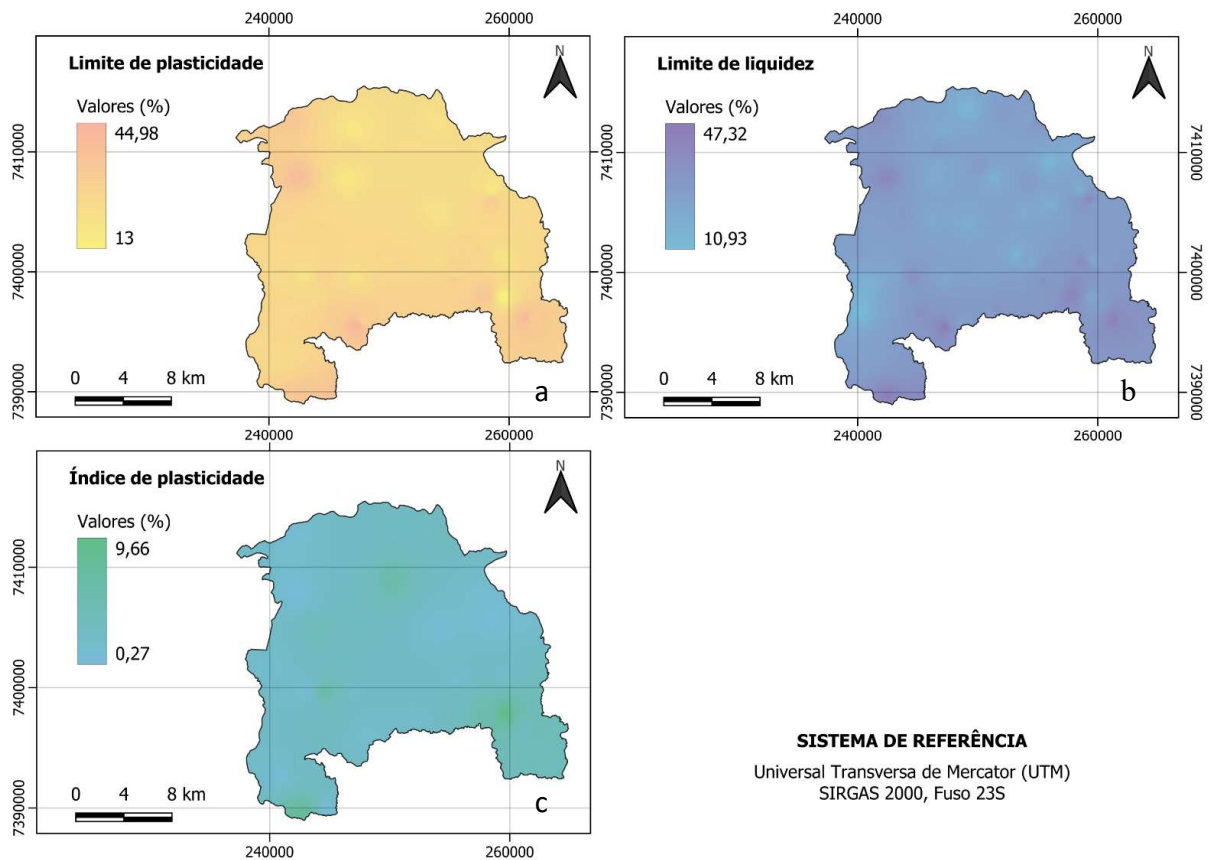


Figura 6.5. Porcentagens dos Limites de Consistência do solo para o horizonte superficial (Mapa gerado por IDW). a) Limite de plasticidade, b) Limite de liquidez, c) Índice de plasticidade.

O limite de plasticidade é definido como a menor umidade em que o solo pode ser moldado sem se romper, apresentando comportamento plástico (HASAN; ABUEL-NAGA, 2024). Os valores obtidos para o limite de plasticidade (LP) das amostras do horizonte superficial variaram entre 13% e 44,98%, conforme ilustrado na Figura 6.5a. Essa ampla faixa de variação revela uma notável heterogeneidade nas condições físicas dos solos analisados. Os menores valores indicam a predominância de frações menos coesivas, com menor teor de argila e, conseqüentemente, menor capacidade de deformação plástica. Por outro lado, os valores mais elevados de LP sugerem solos com maior conteúdo de argila, o que implica em maior plasticidade e coesão. Essa diversidade de comportamento plástico pode influenciar diretamente propriedades como a compactação, a retenção hídrica e a resposta do solo a esforços mecânicos. Tais aspectos são essenciais tanto para o manejo agrícola quanto para a estabilidade de estruturas em obras civis.

O limite de liquidez corresponde à umidade na qual o solo transita do estado plástico para o estado líquido, caracterizando a consistência do material em condições de alta saturação (O'KELLY, 2024). Na Figura 6.5b, é possível observar que os valores do limite de liquidez (LL) apresentaram variações entre 10,93% e 47,32%. Essa oscilação evidencia diferenças relevantes entre os solos analisados, especialmente no que se refere à resposta à presença de água. Em algumas áreas, o solo se mostrou menos sensível à umidade, mantendo certa firmeza mesmo quando úmido. Em outras, o teor elevado de água favorece a perda de consistência, o que pode indicar maior teor de argila e maior tendência a se comportar como um material mais fluido. Essas diferenças ajudam a entender o comportamento mecânico do solo em situações de saturação.

O índice de plasticidade, por sua vez, é obtido pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, representando a faixa de umidade em que o solo mantém propriedades plásticas. A Figura 6.5c apresenta variações entre 0,27% e 9,66%, com predominância de valores entre 1% e 7%. De acordo com Jenkins (CAPUTO; CAPUTO, 2016), essa faixa caracteriza solos fracamente plásticos, indicando baixa expansividade e menor risco de variações volumétricas acentuadas em função da umidade.

Na Figura 6.6 são apresentados os mapas interpolados com a distribuição percentual dos Limites de Consistência do solo para o horizonte subsuperficial, na região de Sorocaba.

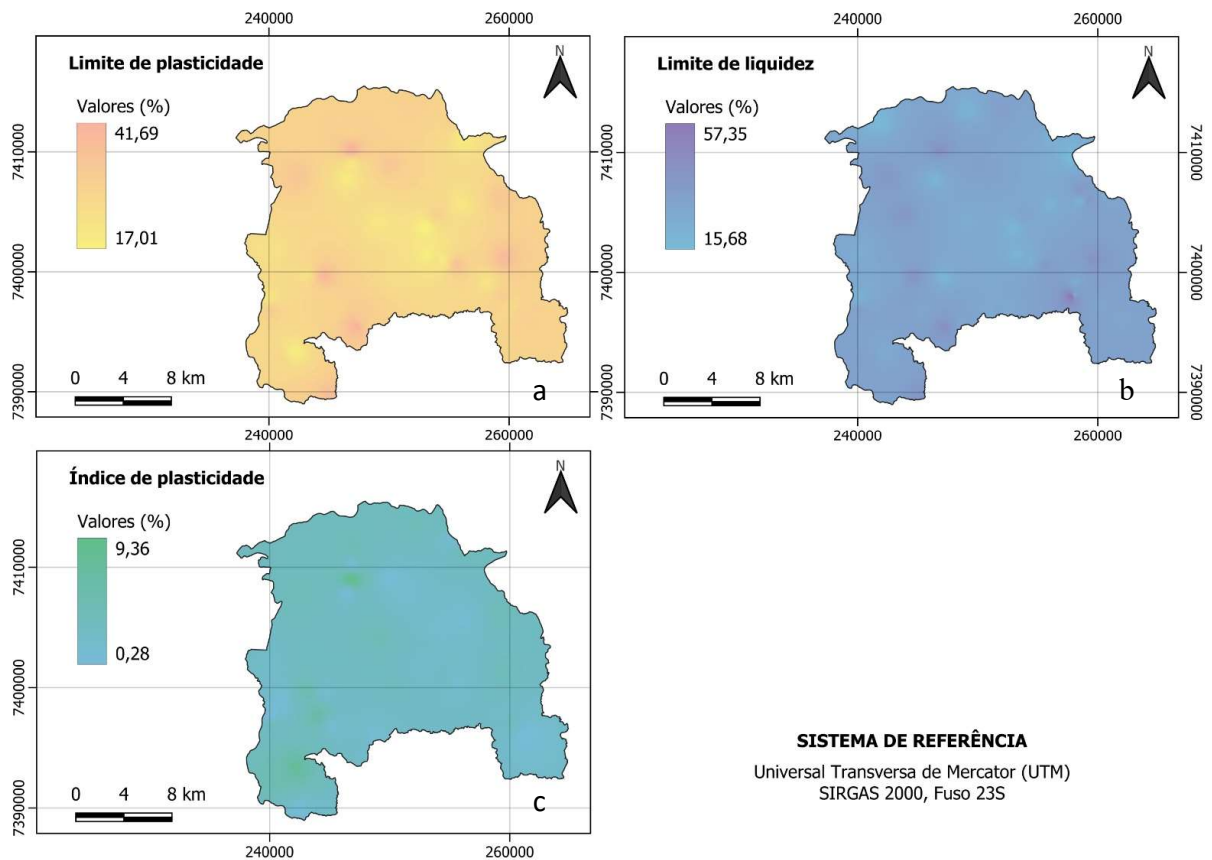


Figura 6.6. Porcentagens dos Limites de Consistência do solo para o horizonte subsuperficial (Mapa gerado por IDW). a) Limite de plasticidade, b) Limite de liquidez, c) Índice de plasticidade.

Os valores do Limite de Plasticidade variaram de 17,01% a 41,69%, conforme mostrado na Figura 6.6a. Essa diferença entre os pontos analisados indica que o solo apresenta comportamentos distintos quanto à sua capacidade de deformar-se sem se romper, o que está diretamente relacionado à quantidade de argila presente em cada amostra.

Na Figura 6.6b Limite de os dados referentes ao Liquidez mostram uma variação entre 15,68% e 57,35%. Essa amplitude revela que alguns solos se tornam fluidos com facilidade quando saturados, enquanto outros mantêm certa resistência mesmo em condições de alta umidade. Esse comportamento depende, em grande parte, da estrutura mineral e do grau de compactação.

O Índice de Plasticidade, representado na Figura 6.6c, teve valores entre 0,28% e 9,36%, com a maior parte das amostras concentrada na faixa entre 1% e 7%. De acordo com a classificação citada por Jenkins (CAPUTO; CAPUTO, 2016), isso indica que os solos da região, em sua maioria,

são fracamente plásticos, o que pode ser positivo em alguns contextos de uso, pois reduz o risco de deformações excessivas causadas por variações de umidade.

Na Figura 6.7 é apresentada a distribuição espacial do Carbono Orgânico Total (COT), no horizonte superficial, do solo de Sorocaba.

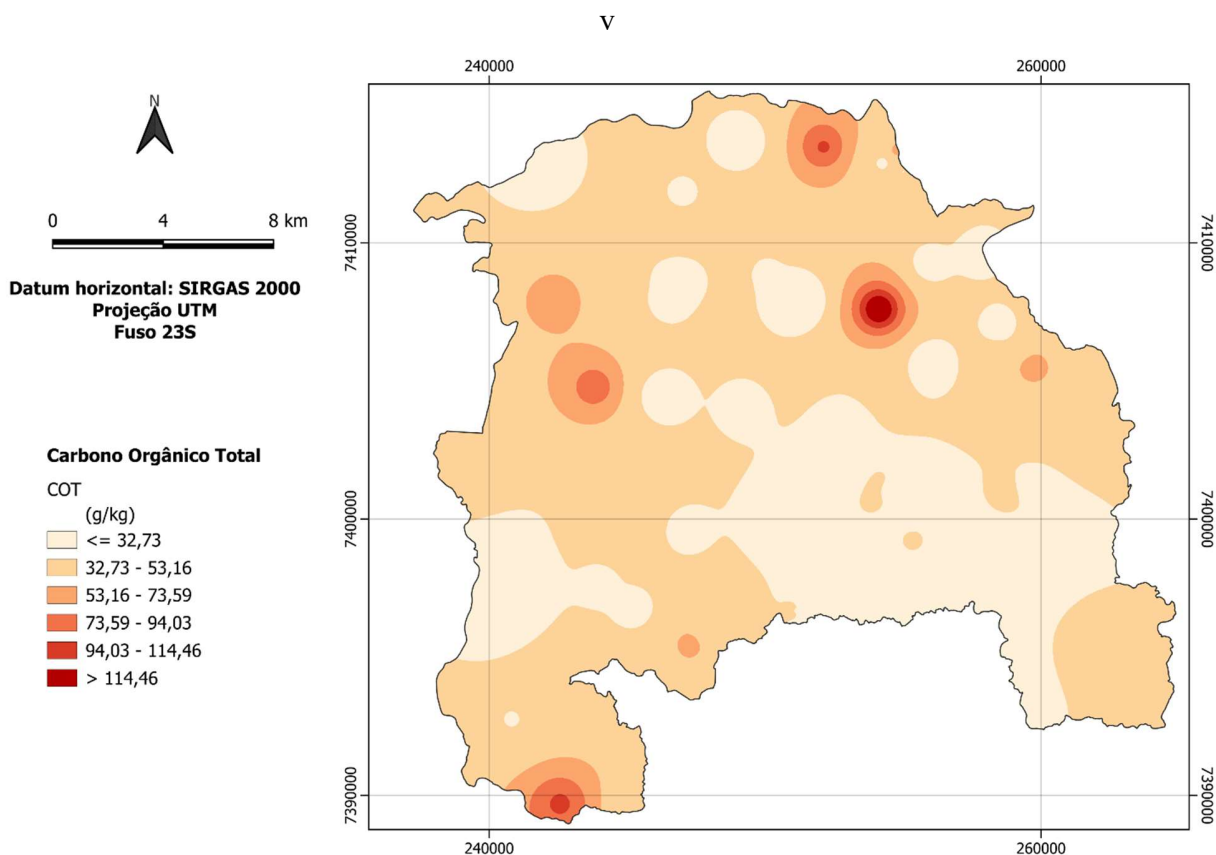


Figura 6.7. Mapa da distribuição espacial do Carbono Orgânico Total (COT) no horizonte superficial, no município de Sorocaba (SP) (interpolado por IDW).

Na Figura 6.7, observa-se uma ampla variação nos teores de COT, com valores que oscilam entre $\leq 32,73 \text{ g.kg}^{-1}$ e $> 114,46 \text{ g.kg}^{-1}$. As maiores concentrações localizam-se em porções isoladas do norte e extremo sul do município, coincidindo com áreas de menor urbanização e presença de vegetação mais conservada. Essas regiões tendem a acumular maior quantidade de matéria orgânica no solo, favorecida pela menor perturbação antrópica e maior aporte de resíduos vegetais.

Em contraste, as áreas centrais e sudeste do território municipal apresentaram os menores valores de COT, indicando maior degradação e perda de matéria orgânica, possivelmente associadas à compactação superficial, ocupação urbana e ausência de cobertura vegetal

permanente. Essa distribuição desigual reforça a influência direta do uso e ocupação do solo sobre a qualidade orgânica dos horizontes subsuperficiais, o que pode comprometer atributos físicos importantes para a estabilidade geotécnica do solo.

Na Figura 6.8 é apresentada a distribuição espacial da Erodibilidade (K_{EPIC}), no horizonte superficial, do solo de Sorocaba.

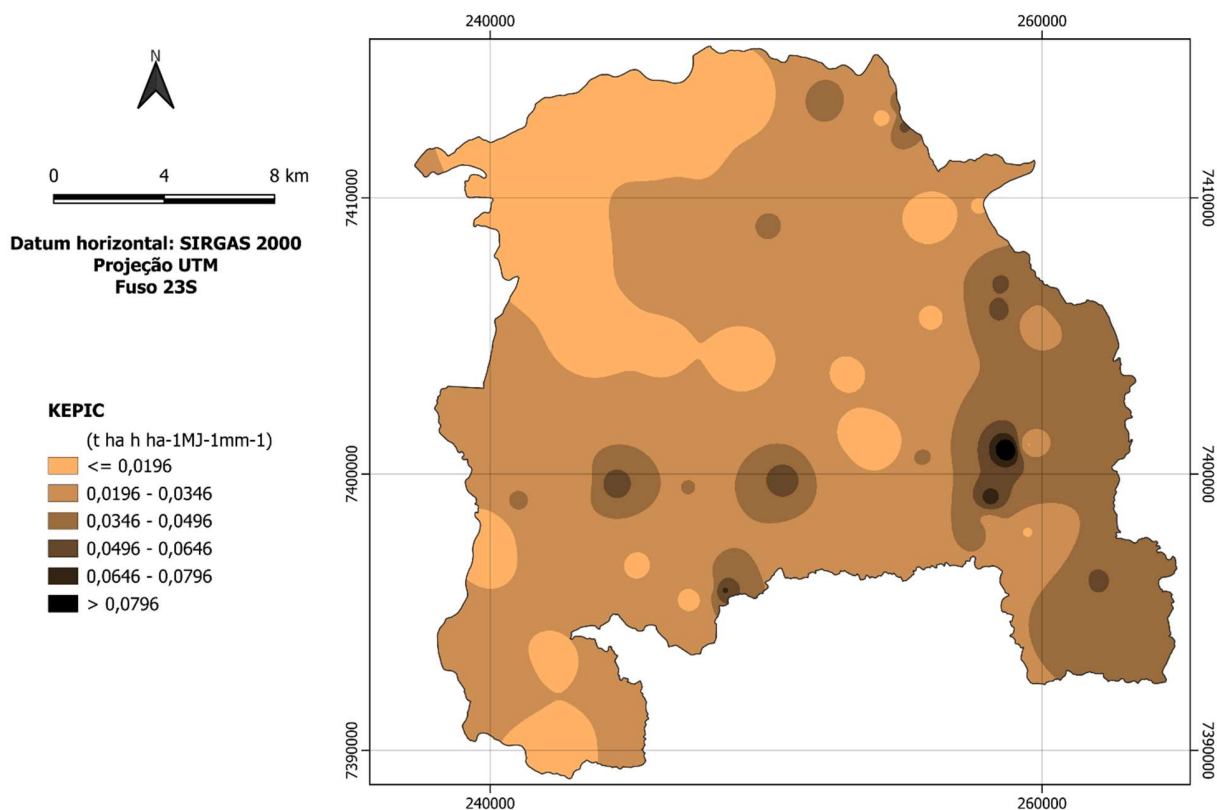


Figura 6.8. Mapa da distribuição espacial da Erodibilidade do solo no horizonte superficial, expressa pelo índice K_{EPIC} , no município de Sorocaba (SP) (interpolado por IDW).

Na Figura 6.8 é apresentada a distribuição espacial do índice de erodibilidade dos solos (K_{EPIC}) em Sorocaba, com valores variando entre $\leq 0,0196$ e $> 0,0796$ $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$. As regiões com maior suscetibilidade à erosão concentram-se no setor leste e em trechos isolados do sul e sudoeste do município, destacadas em tons mais escuros. Esses valores indicam solos menos coesos, possivelmente associados a maior teor de silte e menor cobertura vegetal. Em contrapartida, áreas com baixos índices de erodibilidade estão localizadas predominantemente na faixa centro-norte, onde a textura mais argilosa, associada à vegetação remanescente, contribui para maior

estabilidade superficial. A variação dos valores de K_{EPIC} ao longo do território reforça a influência dos atributos físico-texturais e do uso do solo na vulnerabilidade à degradação.

Na Figura 6.9 é demonstrada a relação entre o teor de silte (%) e os valores do índice de erodibilidade (K_{EPIC}) no horizonte superficial do solo avaliado.

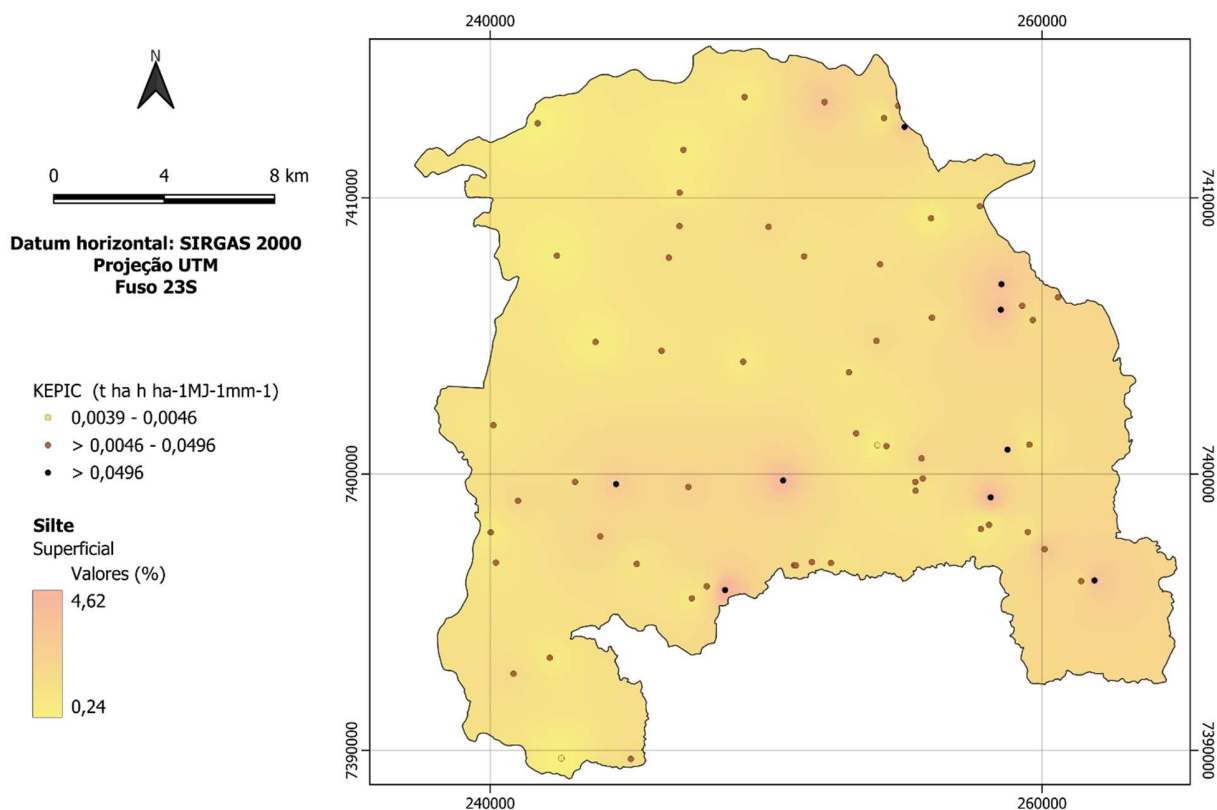


Figura 6.9. Relação entre o percentual de silte e o índice de erodibilidade do solo (K_{EPIC}), no horizonte superficial, no município de Sorocaba (SP).

Observa-se na Figura 6.9 uma tendência positiva entre as variáveis, indicando que o aumento da fração silte está associado a uma maior suscetibilidade à erosão. Esse comportamento é consistente com o conhecimento técnico de que solos com teores elevados de silte apresentam baixa coesão entre partículas, maior facilidade de desagregação e menor capacidade de infiltração, características que favorecem o transporte de partículas por escoamento superficial (COELHO et al., 2024). A significância estatística da correlação reforça a importância do silte como um indicador de instabilidade estrutural e pode subsidiar o desenvolvimento de modelos preditivos de risco erosivo para a região estudada.

6.4. Caracterização Eco-hidrológica dos Solos com base em Análises Laboratoriais.

A Tabela A.4, apresentada no Apêndice A, reúne os valores de carbono orgânico total (COT), expressos em g.kg^{-1} , e os respectivos índices de erodibilidade do solo (K_{EPIC}), em $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, obtidos a partir das análises realizadas nos diferentes pontos de amostragem.

Os teores de COT variaram entre $14,95 \text{ g.kg}^{-1}$ (ponto 27) e $98,63 \text{ g.kg}^{-1}$ (ponto 50), com distribuição heterogênea entre as unidades amostradas. Já os valores de K_{EPIC} oscilaram entre $0,0041$ e $0,1017 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, com o menor índice observado no ponto 11 e o maior no ponto 7.

Alguns pontos apresentaram teores moderados de carbono orgânico e baixos índices de erodibilidade, enquanto outros, com COT mais elevado, registraram valores igualmente altos de K_{EPIC} . A variação dos dados evidencia a existência de diferentes condições locais entre os pontos analisados.

7. DISCUSSÃO.

A interação entre as condições de cobertura do entorno, a localização geográfica dos pontos de amostragem (Tabela A.1) e os atributos físicos, mecânicos, geotécnicos, hidrológicos e ecológicos do solo (Tabelas A.2, A.3 e A.4) revela padrões que ajudam a explicar a distribuição dos processos erosivos no município de Sorocaba. Diversos fatores ambientais e antrópicos atuam de forma integrada, influenciando a estabilidade superficial e a suscetibilidade dos solos à degradação.

7.1. Análise integrada das coordenadas geográficas e da cobertura do entorno.

A espacialização dos pontos de coleta, com base nas coordenadas geográficas (UTM), permite identificar padrões territoriais relevantes entre a cobertura do entorno (CE) e a ocorrência de processos erosivos. De modo geral, observa-se que áreas com cobertura vegetal mais preservada, como trechos de mata e cerrado, apresentam ausência ou número reduzido de indicadores de erosão, a exemplo dos pontos 4, 11, 12, 24, 26, 28, 41, 43, 53, 60, 63, 64 e 65. Essas áreas demonstram maior estabilidade superficial, refletindo a atuação protetiva da vegetação sobre o solo, tanto em termos de interceptação das gotas de chuva quanto de contenção do escoamento superficial.

Em contraste, pontos localizados em áreas com cobertura degradada ou ausente, como solo exposto, mata degradada, Cerrado com sinais de queimada, gramínea rala ou degradada, pastagens e terrenos urbanos em uso parcial, apresentaram múltiplos indicadores de erosão. Isso é evidenciado nos pontos 3, 6, 8, 18, 31, 32, 36, 42, 44, 49, 54 e 61, onde os sinais de instabilidade superficial são recorrentes. A redução da cobertura vegetal nessas áreas intensifica o impacto direto das chuvas, favorece o alisamento da superfície e compromete a infiltração de água, fatores que, combinados, elevam a suscetibilidade à erosão hídrica (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

Esse padrão de distribuição espacial dos processos erosivos coincide com os achados de Soares et al. (2024), que destacam a correlação entre a degradação da vegetação e a intensificação da erosão, sobretudo pela perda da rugosidade natural do solo, pela diminuição da infiltração e pelo aumento do escoamento superficial (SALOMÃO E SILVA, 2021).

Esses resultados reforçam a importância de considerar a cobertura do entorno como um fator determinante na estabilidade físico-hidrológica do solo, especialmente em áreas sob pressão antrópica. A presença ou ausência de vegetação não apenas influencia a ocorrência direta de processos erosivos, mas também afeta variáveis associadas, como a resistência à penetração, a rugosidade superficial e a dinâmica da infiltração de água. Como destacado por Liu et al. (2018), a estrutura multidimensional da vegetação desempenha um papel crucial na redução do escoamento superficial e na perda de solo, promovendo maior infiltração e estabilidade do solo. Assim, a leitura integrada dos dados de campo e das condições de cobertura permite qualificar os pontos quanto à sua estabilidade ou vulnerabilidade potencial, subsidiando intervenções direcionadas à conservação e ao manejo sustentável do solo.

7.2. Indicadores de erosão e condições ambientais associadas.

Dos 65 pontos avaliados, os que apresentaram maior número de indicadores de erosão concentram-se, majoritariamente, em áreas antropizadas, com uso intensivo do solo ou ausência significativa de cobertura vegetal. É o caso dos pontos 32 (Solo exposto), 36 (Solo exposto – pátio de estacionamento), 39 (Solo exposto – obra em andamento), 40 (Agrícola – canavial) e 44 (Solo exposto com trabalho de trator), os quais evidenciam a fragilidade estrutural do solo frente à interferência antrópica contínua e à carência de práticas adequadas de conservação. Nesses ambientes, a exposição direta do solo às intempéries, associada à ausência de proteção vegetal e à modificação de sua estrutura superficial, intensifica a suscetibilidade à erosão hídrica, especialmente em períodos de maior pluviosidade (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

Mesmo em áreas urbanizadas parcialmente recobertas por gramíneas ou infraestrutura superficial, observa-se a presença de riscos erosivos latentes, como nos pontos 31 (Terreno urbano com solo exposto), 50 (Área periférica de lote com gramínea esparsa) e 54 (Terreno urbano). Nesses locais, embora o número de indicadores de erosão não seja elevado, observou-se evidências de compactação superficial e alisamento do terreno, condições que dificultam a infiltração de água, aumentam o escoamento superficial e favorecem o início de processos erosivos, especialmente em micro depressões ou áreas com declividade leve (AGUIAR et al., 2021). Tais características demandam atenção preventiva no contexto do planejamento urbano e do uso e ocupação do solo.

7.3. Resistência do solo (Penetrômetro).

A análise dos dados obtidos com o penetrômetro, expressos em profundidade (cm) e impacto por decímetro (impacto.dm^{-1}), evidencia diferenças significativas na resistência mecânica do solo em função da cobertura vegetal e do grau de degradação.

Maiores profundidades de penetração (≥ 10 cm), obtidas com três impactos do penetrômetro, foram registradas em áreas onde o solo apresentou menor resistência mecânica, o que pode indicar estrutura superficial mais solta, menor compactação ou fragilidade estrutural. Essa condição foi observada nos pontos 3 (Solo exposto), 16 (Praça urbana), 17 (Área declivosa com grama recém queimada), 19 (Praça urbana), 21 (Beira de estrada com graminéa), 44 (Solo exposto com trabalho de trator) e 65 (Borda de fragmento de vegetação natural remanescente, beira de estrada asfaltada). A presença de cobertura vegetal não necessariamente implica maior resistência, especialmente quando essa vegetação é recente, rala ou sobre solo degradado. Além disso, o uso antrópico intenso, como o revolvimento mecânico ou a queima superficial, pode comprometer a estrutura agregada do solo, favorecendo sua penetração e indicando suscetibilidade à mobilização por processos erosivos (FERNANDES, 2023), sobretudo em terrenos inclinados ou com baixa rugosidade superficial.

Menores profundidades de penetração (≤ 5 cm), registradas com três impactos do penetrômetro, indicam solos com maior resistência mecânica à penetração, muitas vezes associados à compactação superficial ou maior densidade. Esse comportamento foi observado, por exemplo, nos pontos 4 (Cerrado degradado – 1,9 cm), 27 (Pasto malformado – 2,3 cm), 25 (Gramínea com estrutura laminar – 2,7 cm) e 38 (Pasto bem conservado – 2,6 cm).

Nos casos acima, embora possa haver cobertura vegetal, a resistência à penetração sugere solos mais compactos, o que pode estar relacionado a processos naturais (como estrutura argilosa consolidada) ou antrópicos (como pisoteio, uso agrícola ou baixa porosidade). Solos mais compactados tendem a dificultar a infiltração de água, e, quando associados à baixa rugosidade superficial e ausência de cobertura vegetal, podem favorecer o escoamento superficial. Esse escoamento concentrado é o principal responsável pelo desencadeamento da erosão laminar, conforme discutido por Aguiar et al. (2021).

Em termos de resistência ao impacto (impacto/dm), valores elevados sugerem compactação e menor porosidade, enquanto valores baixos, como os dos pontos 3 (1,9), 21 (0,9) e 65 (1,7),

sinalizam solos frágeis, com baixa resistência estrutural, especialmente preocupantes do ponto de vista hidromecânico.

Estudos como os de Aguiar et al. (2021) reforçam a relação entre o grau de compactação e a infiltração da água, impactando diretamente o risco de erosão laminar e em sulcos. `

7.4. Conexão entre cobertura do entorno, estabilidade e vulnerabilidade do solo.

A análise integrada dos dados referentes à cobertura do entorno, aos indicadores de erosão e aos resultados obtidos com o penetrômetro permitiu identificar padrões consistentes de estabilidade e vulnerabilidade nas áreas avaliadas. De modo geral, áreas recobertas por vegetação densa e contínua, como fragmentos de mata e cerrado preservado, apresentaram maior estabilidade superficial, associada à ausência ou número reduzido de indicadores erosivos e resistência satisfatória à penetração. Em contrapartida, áreas com solo exposto, cobertura vegetal degradada ou submetidas a uso intensivo revelaram instabilidade marcante. Nesses ambientes, múltiplos indicadores de erosão estiveram associados a comportamentos extremos de resistência do solo, demonstrando maior suscetibilidade à mobilização por agentes erosivos.

Destacam-se, nesse contexto, os pontos 3, 36 e 44, todos classificados como áreas de solo exposto, nos quais se verifica uma interseção direta entre ausência de cobertura vegetal efetiva, elevado número de indicadores de erosão e valores críticos de resistência à penetração. Em campo, esses pontos apresentaram processos erosivos visíveis e comportamento mecânico indicativo de fragilidade estrutural, expressa ora por alta penetração com poucos impactos (solo mais solto e desagregado), ora por resistência superficial mínima. Essas condições favorecem a suavização da superfície, dificultam a infiltração da água e intensificam o escoamento superficial, criando um ambiente propício à erosão laminar e à degradação progressiva do solo.

Os dados obtidos com o penetrômetro reforçam essa interpretação. Solos que permitiram maior profundidade de penetração com número fixo de impactos apresentaram menor resistência estrutural, sinalizando fragilidade superficial e tendência à desagregação, enquanto valores de penetração reduzidos refletiram maior compactação superficial, o que pode dificultar a infiltração e favorecer o escoamento concentrado, especialmente quando associado à baixa rugosidade da superfície. Ambos os casos, embora distintos do ponto de vista físico-mecânico, convergem em

termos de vulnerabilidade hidrológica, já que comprometem a capacidade de retenção hídrica e aumentam o risco de erosão superficial.

Essas observações estão em consonância com os achados de Liu et al. (2018), que destacam o papel da estrutura multidimensional da vegetação na contenção do escoamento superficial e na proteção da camada superficial do solo. A ausência de cobertura adequada acelera a perda de partículas finas, reduz a infiltração e compromete a estabilidade hidromecânica do terreno. Portanto, os resultados demonstram que a estabilidade do solo é determinada por uma interação complexa entre a cobertura vegetal, as propriedades físicas superficiais e o grau de interferência antrópica. A compreensão integrada desses fatores permite qualificar os diferentes ambientes quanto à sua vulnerabilidade, orientando estratégias de manejo e conservação do solo com base em evidências empíricas sólidas.

7.5. Relação entre a granulometria do solo e a estabilidade superficial.

A análise estatística descritiva dos dados granulométricos dos horizontes superficial e subsuperficial revela padrões relevantes para a interpretação da estabilidade hidromecânica do solo, especialmente quando integrados aos indicadores de erosão e aos resultados do ensaio com penetrômetro. Observa-se, em ambos os horizontes, a predominância da fração areia grossa e média, com médias percentuais em torno de 70%, acompanhadas de coeficientes de variação relativamente baixos (17,8% no horizonte superficial e 16,0% no subsuperficial), o que indica homogeneidade estrutural nesse componente entre as amostras.

Essa distribuição textural sugere que grande parte das áreas estudadas é composta por solos mais arenosos, com menor capacidade de retenção de água e coesão entre partículas, fatores que podem favorecer a infiltração inicial, mas também acelerar a perda de água por percolação e reduzir a resistência à desagregação quando há ausência de cobertura vegetal. Esses aspectos corroboram os achados discutidos na seção anterior, nos quais a combinação entre textura arenosa, ausência de vegetação e baixa resistência à penetração esteve associada a maior suscetibilidade à erosão em diversos pontos com solo exposto (PESSOA et al., 2024a; SMAGIN, 2025).

Outro aspecto importante diz respeito ao comportamento das frações mais finas. A fração silte, no horizonte subsuperficial, apresentou coeficiente de variação bastante elevado (115,7%),

acompanhado por um aumento significativo no valor máximo (25,7%) em comparação ao horizonte superficial (9,5%). Essa heterogeneidade indica que, em certas camadas subsuperficiais, há acúmulo localizado de partículas mais finas, o que pode interferir na drenagem e compactação, afetando a dinâmica de infiltração e o comportamento mecânico do solo (PESSOA et al., 2024b; CRUZ et al., 2024).

A argila também apresentou maior média e valor máximo no horizonte subsuperficial, com aumento do coeficiente de variação (45,7%) em relação ao horizonte superficial (37,4%), reforçando a ideia de uma maior diversidade textural entre os pontos analisados na camada mais profunda. Esses resultados são especialmente relevantes para os pontos em que o perfil de resistência mostrou penetração superficial baixa, sugerindo que, além da compactação superficial por ações antrópicas, o próprio aumento da fração argilosa em subsuperfície pode estar contribuindo para a redução da infiltração e para o acúmulo de água na camada superior, favorecendo processos erosivos laminares em eventos de alta pluviosidade.

Portanto, a distribuição granulométrica, embora relativamente homogênea em sua fração arenosa, revela zonas de heterogeneidade nas frações finas que devem ser consideradas na avaliação da estabilidade e no planejamento de intervenções de conservação do solo. A combinação entre textura, cobertura do entorno e resposta mecânica à penetração oferece um panorama abrangente das condições de vulnerabilidade dos perfis analisados, contribuindo para o entendimento sistêmico dos processos erosivos nas diferentes unidades amostradas.

7.6. Variações verticais nos atributos físicos do solo com base no teste de Kruskal-Wallis.

A aplicação do teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952) aos dados dos horizontes superficial e subsuperficial permitiu identificar padrões de uniformidade e heterogeneidade ao longo do perfil do solo. Para diversos atributos físicos, como densidade, frações granulométricas de areia (grossa, média e fina), silte e índices de consistência (limites de liquidez e de plasticidade), os resultados indicaram ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os dois horizontes. Tal resultado sugere que esses parâmetros se mantêm relativamente constantes com a profundidade, apontando para uma estabilidade estrutural vertical do solo nas áreas analisadas.

Entretanto, duas variáveis destacaram-se por apresentarem variações significativas: o teor de umidade e a concentração de argila. O solo subsuperficial apresentou teores de umidade consideravelmente mais elevados, indicando maior capacidade de retenção hídrica em camadas mais profundas. Esse comportamento pode estar relacionado à menor aeração, maior compactação relativa e ao acúmulo de finos nessa porção do perfil, o que reduz a percolação vertical e favorece o armazenamento de água.

De forma semelhante, a fração argilosa apresentou aumento significativo no horizonte subsuperficial, evidenciando um gradiente textural típico de ambientes onde processos como iluviação ou deposição secundária de argila podem ter ocorrido ao longo do tempo (SANTOS et al., 2018). A maior presença de argila em subsuperfície afeta diretamente a coesão dos agregados, a infiltração de água e a resistência à penetração, podendo, em determinados contextos, aumentar a suscetibilidade ao encharcamento superficial e à erosão por escoamento concentrado (PESSOA et al., 2024b; CRUZ et al., 2024).

Esses resultados complementam a análise integrada desenvolvida nas seções anteriores, reforçando que, embora alguns atributos físicos do solo permaneçam constantes ao longo do perfil, a variabilidade na umidade e na concentração de argila entre os horizontes interfere significativamente na dinâmica hidromecânica do solo. Tal diferenciação vertical deve ser considerada em qualquer estratégia de conservação e manejo, visto que influencia diretamente o comportamento do solo frente à erosão, à compactação e à redistribuição da água no perfil.

7.7. Diferenciação entre horizontes com base na Análise Discriminante Multivariada (ADM).

A análise discriminante multivariada (ADM), aplicada às variáveis físicas do solo, incluindo as frações granulométricas (areia grossa e média, areia fina, silte e argila) e a densidade, evidenciou a capacidade de distinção entre as amostras dos horizontes superficial e subsuperficial. Esse método estatístico, ao buscar combinações lineares que maximizam a separação entre grupos, revelou um padrão claro de diferenciação, especialmente ao longo do primeiro componente discriminante.

Neste eixo, observou-se maior dispersão das amostras do horizonte subsuperficial, concentradas predominantemente em valores negativos, entre 0 e -5, com um ponto extremo entre -10 e -15. Tal comportamento indica uma variabilidade mais acentuada nas características físicas dessa camada, contrastando com o horizonte superficial, cujos pontos apresentaram distribuição mais agrupada e centralizada. Esses achados corroboram os resultados obtidos nas análises descritivas e nos testes de Kruskal-Wallis, sobretudo no que se refere à maior variabilidade da fração silte e do teor de argila nas camadas mais profundas.

Por outro lado, o segundo componente discriminante demonstrou menor capacidade de separação entre os grupos, com sobreposição considerável entre os pontos representativos de ambos os horizontes. Essa limitação evidencia que, apesar de algumas variáveis contribuírem para diferenciar os horizontes, a separação estatística não é plenamente eficiente em todas as dimensões analisadas.

A presença dessa sobreposição, associada à dispersão assimétrica, reforça a interpretação de que os perfis de solo apresentam transições graduais entre os horizontes, com fronteiras difusas, como é típico de sistemas edáficos submetidos a processos de formação e evolução contínuos. Essa heterogeneidade vertical, especialmente no que diz respeito às frações finas e à densidade do solo, tem implicações diretas sobre os processos hidromecânicos que afetam a estabilidade superficial. Essa interpretação está em consonância com a literatura, que destaca a influência da variabilidade textural e estrutural do solo sobre a susceptibilidade a processos erosivos e à dinâmica de infiltração e escoamento superficial (RAJARATHINAM; RAMJI, 2023; TEIXEIRA et al., 2021).

Assim, os resultados obtidos por meio da ADM reforçam a necessidade de um manejo diferenciado entre os horizontes do solo, com especial atenção às camadas subsuperficiais, que demonstram maior vulnerabilidade em função de sua heterogeneidade física.

7.8. Aplicabilidade de funções de pedotransferência com base em correlação e regressão.

A análise estatística envolvendo os testes de correlação de Spearman e regressão linear teve como objetivo avaliar o potencial preditivo de variáveis físico-texturais e eco-hidrológicas do solo, visando subsidiar a formulação de funções de pedotransferência (FPTs). Ao considerar separadamente os horizontes superficial e subsuperficial, os resultados revelaram diferentes

padrões de associação entre os atributos do solo. No entanto, apenas um dos modelos gerados apresentou coeficiente de determinação suficientemente elevado para ser considerado aplicável em contextos práticos.

No horizonte superficial, a relação entre o teor de silte e a erodibilidade do solo (K_{EPIC}) destacou-se de forma expressiva. Os resultados indicaram uma correlação de Spearman elevada ($r_s = 0,8056$; $p < 0,0001$; $n = 65$) e um coeficiente de determinação (R^2) de 83%, evidenciando uma associação direta e estatisticamente robusta entre o aumento da fração silte e o incremento da erodibilidade. A regressão linear ajustada para esses dados resultou na seguinte equação 6.1.

$$K_{EPIC} = 0,0138 \times \text{Silte} + 0,0054 \quad (6.1)$$

Essa relação reforça o papel determinante da fração silte na estabilidade superficial dos solos estudados (COELHO et al., 2024). Em ambientes com textura predominantemente arenosa, como o observado na maior parte dos pontos amostrados, pequenas variações no teor de silte, fração reconhecidamente de baixa coesão e alta susceptibilidade à mobilização, resultam em aumentos significativos da erodibilidade. Esse comportamento é coerente com os padrões previamente discutidos, nos quais a combinação entre textura frágil, baixa rugosidade superficial e ausência de cobertura vegetal natural contribui para a intensificação dos processos erosivos (FERNANDES, 2023).

A elevada significância estatística desse modelo, aliada ao embasamento técnico consistente, permite considerá-lo como uma FPT de aplicação recomendável para estimativas indiretas de erodibilidade em solos com características semelhantes às da área de estudo.

Por outro lado, as demais correlações testadas no horizonte superficial, embora algumas tenham sido estatisticamente significativas ($p < 0,05$), apresentaram coeficientes de determinação inferiores a 80%, o que limita sua aplicação como modelos preditivos confiáveis. Relações como argila $\times$ limite de liquidez (LL), argila $\times$ limite de plasticidade (LP) e areia $\times$ carbono orgânico total (COT), por exemplo, exibiram R^2 variando entre 16% e 33%, o que demonstra baixa capacidade explicativa. Além disso, algumas combinações, como silte $\times$ COT ou COT $\times$ K_{EPIC} , não apresentaram correlação significativa, evidenciando ausência de relação funcional direta entre essas variáveis.

No horizonte subsuperficial, o padrão observado foi semelhante. Ainda que algumas correlações tenham demonstrado significância estatística, como silte $\times$ LP ($r_s = 0,4015$; $p = 0,0092$), os valores de R^2 permaneceram baixos (menores que 11%), refletindo fraca capacidade preditiva. A maior correlação registrada nesse horizonte ocorreu entre argila e areia ($r_s = 0,5628$), com R^2 de 30,29%, valor ainda considerado insuficiente para aplicação como FPT.

De maneira geral, esses resultados sugerem que, embora existam relações estatisticamente consistentes entre algumas propriedades físicas do solo, a elevada variabilidade espacial, a natureza heterogênea dos horizontes e as características texturais predominantes limitam a utilização de modelos univariados como ferramentas preditivas robustas (BISOLO et al., 2024). A única exceção encontrada foi a equação entre silte e erodibilidade no horizonte superficial, que apresentou desempenho estatístico satisfatório para uso prático como FPT.

Esse conjunto de evidências reforça a importância de critérios rigorosos na formulação de FPTs, bem como a necessidade de validação regional antes de sua adoção como modelo preditivo. Para os demais atributos analisados, recomenda-se cautela quanto à aplicação de modelos derivados, sendo indispensável a realização de estudos complementares, com inclusão de maior número de variáveis, uso de abordagens multivariadas e execução de testes de acurácia para ampliar a confiabilidade das predições.

7.9. Interpretação do gradiente textural entre horizontes do solo.

A avaliação do gradiente textural, expressa pela razão entre as médias das frações granulométricas nos horizontes subsuperficial e superficial, permite inferir a dinâmica vertical dos constituintes do solo ao longo do perfil. Essa razão é particularmente útil para identificar mudanças significativas na distribuição de partículas e seus efeitos sobre as propriedades hidromecânicas e estruturais do solo.

Entre os resultados obtidos, destaca-se o valor de 1,2 para o gradiente textural da fração argila, indicando um aumento expressivo (igual ou superior a 20%) do teor de argila na camada subsuperficial em comparação à superficial. Esse padrão é típico de perfis em que ocorrem processos pedogenéticos como a iluviação, característicos de solos do tipo Argissolo e Luvisolo, nos quais há migração descendente e acúmulo de partículas finas, especialmente argila, no

horizonte B (SANTOS et al., 2018). Essa transição textural tem implicações importantes para o comportamento do solo, influenciando diretamente a percolação de água, a retenção hídrica, o desenvolvimento radicular e a resistência à penetração, além de aumentar a susceptibilidade à erosão superficial em função do acúmulo hídrico acima da camada mais densa.

Esse valor limítrofe de 1,2 é também reconhecido oficialmente pela Embrapa (2018) como critério diagnóstico para a identificação de horizontes texturais no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, reforçando sua importância pedológica e agrônoma. A presença desse gradiente em parte significativa das amostras do presente estudo corrobora os padrões observados nas análises de resistência à penetração e no comportamento da umidade no perfil, discutidos nas seções anteriores.

No entanto, as demais frações granulométricas, areia grossa e média (1,0), areia fina (0,9) e silte (1,0), apresentaram gradientes texturais próximos da unidade, sugerindo que não houve alteração significativa dessas frações ao longo do perfil. Apesar de o silte ter mostrado alta variabilidade no horizonte subsuperficial, conforme evidenciado pelo coeficiente de variação, essa oscilação foi pontual e não refletida na média geral.

Esses resultados reforçam a centralidade da fração argila na interpretação do gradiente textural e, por consequência, na análise da estabilidade físico-hidrológica do solo. Em solos com tendência à texturização em profundidade, o planejamento de práticas de conservação deve considerar a possibilidade de restrição ao fluxo vertical de água e à penetração radicular, promovendo soluções que atenuem o escoamento superficial e preservem a estrutura do horizonte superficial (RAJARATHINAM; RAMJI, 2023).

7.10. Interpretação das propriedades físicas do solo avaliadas numa abordagem geoespacial.

A análise geoespacial das propriedades texturais e dos índices de consistência dos solos no município de Sorocaba (SP) permitiu uma compreensão aprofundada da heterogeneidade edáfica local e de suas implicações para o comportamento físico dos diferentes horizontes. No horizonte superficial, a predominância de frações arenosas, com teores superiores a 87%, indicou um cenário de elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção hídrica. Essas características, associadas

a baixos teores de silte e argila, configuram um ambiente estruturalmente frágil e altamente suscetível à mobilização de partículas finas, especialmente em áreas desprovidas de cobertura vegetal ou com declividades acentuadas.

O horizonte subsuperficial, apesar de manter a dominância da fração areia, apresentou maior variabilidade textural, com aumentos expressivos nas concentrações de silte e argila em determinadas regiões. Esse padrão sugere a ocorrência de processos pedogenéticos típicos de ambientes tropicais, como a iluviação, que contribuem para o enriquecimento de frações finas em camadas mais profundas (SANTOS et al., 2018). A presença de maior quantidade de argila nessas camadas implica, por um lado, maior capacidade de retenção de água e coesão estrutural, mas, por outro, aumento no risco de compactação e dificuldades ao desenvolvimento radicular.

A interpolação espacial dos dados, realizada pelo método Inverse Distance Weighting (IDW), com resolução de 10 metros, evidenciou zonas com contrastes texturais significativos. Foram identificados setores com predominância de areia grossa e média, intercalados com áreas de maior concentração de silte e argila, reforçando a necessidade de abordagens de manejo diferenciadas em função da localização e das condições edáficas de cada setor.

Os limites de consistência apresentaram distribuição igualmente variável. Os valores reduzidos do índice de plasticidade, mesmo nas regiões mais argilosas, sugerem solos de baixa expansividade, o que, por um lado, minimiza os riscos de deformações volumétricas, mas, por outro, não elimina a preocupação com a compactação superficial, sobretudo em áreas sujeitas a tráfego de equipamentos ou intensas práticas agrícolas (CAPUTO; CAPUTO, 2016).

No que se refere ao Carbono Orgânico Total (COT), a análise geoespacial evidenciou uma expressiva heterogeneidade na distribuição dos teores ao longo do município de Sorocaba. As maiores concentrações de COT localizam-se em áreas isoladas nas porções norte e extremo sul do município, coincidentes com zonas de menor urbanização e maior presença de cobertura vegetal preservada. Esse padrão indica ambientes menos impactados por atividades antrópicas, com maior acúmulo de resíduos vegetais e condições ambientais favoráveis à manutenção da matéria orgânica no solo. Por outro lado, os menores teores de COT foram registrados nas regiões centrais e sudeste, justamente onde predominam processos de urbanização mais intensa, compactação superficial e significativa redução da cobertura vegetal. Essa distribuição desigual reforça a estreita relação entre o uso e ocupação do solo e a qualidade orgânica dos horizontes edáficos, refletindo o histórico de manejo, as pressões antrópicas e as condições ambientais locais.

Essa variação espacial do COT tem implicações diretas sobre a dinâmica física e hidrológica do solo. A deficiência de matéria orgânica nas zonas mais urbanizadas e degradadas pode comprometer atributos estruturais importantes, como a formação de agregados estáveis, a porosidade e a capacidade de retenção de água, aumentando a vulnerabilidade desses solos aos processos erosivos. Nesse contexto, a identificação de áreas com baixos teores de COT torna-se fundamental para subsidiar ações de recuperação e conservação, orientadas ao aumento do estoque de matéria orgânica e à melhoria da qualidade física dos solos mais impactados.

Corroborando essa tendência, a análise espacial dos índices de erodibilidade (K_{EPIC}) evidenciou a presença de setores críticos nas porções sudeste e leste do município, onde os maiores valores de K_{EPIC} coincidem com áreas de uso urbano recente e regiões degradadas. Observa-se uma sobreposição espacial entre zonas de baixo teor de COT e altos índices de erodibilidade, sugerindo que a deficiência de matéria orgânica pode estar contribuindo para a redução da resistência estrutural dos solos e para o aumento da susceptibilidade à desagregação superficial. Essa relação espacial reforça o entendimento de que os fatores antrópicos, associados às características físicas do solo, exercem papel determinante na amplificação dos riscos erosivos.

Esse diagnóstico, consistente com as observações de Godoi et al. (2021), destaca a vulnerabilidade dos solos arenosos e de baixa proteção vegetal, típicos de ambientes urbanos e periurbanos em expansão desordenada. Assim, a análise integrada das propriedades físicas, dos teores de COT e dos padrões de erodibilidade permite delinear diretrizes preliminares para a gestão ambiental e o uso sustentável do solo no município de Sorocaba.

Esses achados reforçam a importância de aprofundar a compreensão sobre os mecanismos que ligam a qualidade orgânica dos solos aos processos erosivos. Em especial, destaca-se a necessidade de avaliar estatisticamente como as variações nos teores de carbono orgânico total (COT) influenciam os índices de erodibilidade (K_{EPIC}), permitindo quantificar o papel da matéria orgânica na resistência à desagregação superficial e no controle da perda de solo em diferentes contextos de uso e ocupação do território.

7.11. Relação entre carbono orgânico total (COT) e erodibilidade do solo (K_{EPIC}).

A análise dos teores de carbono orgânico total (COT) e dos índices de erodibilidade (K_{EPIC}) revelou uma relação complexa entre a qualidade orgânica do solo e sua resistência à ação erosiva. Observou-se que, embora o COT seja um fator reconhecido por favorecer a estabilidade estrutural, os solos da área de estudo apresentaram um comportamento não linear entre o aumento da matéria orgânica e a redução da erodibilidade.

A significativa heterogeneidade nos valores de COT, com concentrações variando de níveis bastante baixos a valores relativamente elevados, reflete a diversidade de condições de uso, cobertura vegetal e manejo ao longo dos diferentes pontos amostrados. Essa variabilidade reforça a influência das práticas antrópicas sobre o estoque de matéria orgânica nos solos urbanos e periurbanos de Sorocaba. Em locais mais preservados ou com cobertura vegetal mais densa, os teores de COT tenderam a ser maiores, enquanto nas áreas degradadas ou expostas, os níveis foram consideravelmente reduzidos.

Do ponto de vista da erodibilidade, a variação espacial observada indica que, mesmo em áreas com COT relativamente elevado, os solos não apresentaram, necessariamente, baixos índices de K_{EPIC} . Esse comportamento pode ser explicado pelas características texturais dominantes da região, marcadas por alta proporção de areia e baixa coesão entre partículas. Solos com textura mais arenosa, mesmo quando enriquecidos com matéria orgânica, mantêm baixa capacidade de formação de agregados estáveis, o que limita o efeito protetor da matéria orgânica contra os processos erosivos (PINTO et al., 2020).

Além disso, a interação entre teor de silte e erodibilidade também merece destaque. Em pontos com maiores concentrações dessa fração, especialmente quando associadas a baixos teores de COT, verificou-se um aumento expressivo na suscetibilidade à desagregação superficial. Esse resultado reforça a ideia de que a combinação entre altos teores de silte e baixos níveis de matéria orgânica constitui um fator crítico para o aumento da erodibilidade, como também observado em outros estudos sobre solos de textura arenosa-franca (GODOI et al., 2021; COGO et al., 2022).

Esses achados indicam que a avaliação da estabilidade superficial do solo não pode ser feita com base isolada em um único atributo. A interação entre matéria orgânica, textura e estrutura superficial é determinante para o comportamento hidromecânico dos solos da região, exigindo que programas de manejo considerem estratégias integradas. O estímulo à manutenção ou recuperação

dos teores de matéria orgânica, aliado a práticas que favoreçam a melhoria estrutural e a redução da compactação superficial, torna-se essencial para mitigar os riscos de erosão nas áreas urbanas e periurbanas de Sorocaba.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A investigação realizada permitiu compreender, de maneira integrada, a complexidade dos fatores que condicionam a estabilidade superficial dos solos no município de Sorocaba (SP). A análise conjunta de atributos físicos, hidromecânicos e ecológicos, associada ao uso de ferramentas estatísticas e geoespaciais, proporcionou um diagnóstico detalhado da variabilidade edáfica local e de sua relação com os processos erosivos.

Os resultados evidenciaram que a cobertura do entorno é um dos elementos-chave para a manutenção da estabilidade superficial. Áreas com vegetação mais densa e contínua demonstraram maior resistência à ação das chuvas e ao escoamento superficial, enquanto setores com solo exposto, cobertura degradada ou uso antrópico intenso apresentaram múltiplos indicadores de instabilidade. Essa constatação reforça o papel protetivo da vegetação, tanto na interceptação das gotas de chuva quanto na contenção do escoamento.

Do ponto de vista textural, observou-se a predominância de solos arenosos, com baixa capacidade de retenção de água e reduzida coesão entre partículas. A combinação desses atributos com baixos teores de matéria orgânica, especialmente nas áreas urbanas e periurbanas, configura um cenário de alta vulnerabilidade à desagregação superficial. O gradiente textural entre os horizontes superficial e subsuperficial, evidenciado pelo aumento da fração argila em profundidade, destaca ainda a influência dos processos pedogenéticos sobre a distribuição vertical dos atributos físicos.

As análises de resistência à penetração reforçaram a interpretação de que solos compactados ou excessivamente soltos apresentam diferentes, mas igualmente preocupantes, limitações hidromecânicas. Enquanto a compactação superficial favorece o escoamento concentrado, a baixa resistência estrutural dos solos mais soltos aumenta a suscetibilidade à mobilização de partículas finas.

A espacialização do carbono orgânico total (COT) revelou uma distribuição heterogênea, com os menores teores concentrados em áreas mais urbanizadas e degradadas. Essa condição impacta negativamente a estrutura edáfica, reduzindo a formação de agregados estáveis e a capacidade de retenção de água, fatores que, combinados com as características texturais locais, contribuem para o aumento da erodibilidade.

A relação entre o teor de silte e o índice de erodibilidade (K_{EPIC}) foi estatisticamente robusta no horizonte superficial, o que permitiu a formulação de uma função de pedotransferência (FPT) com potencial de aplicação prática em condições semelhantes. No entanto, para as demais variáveis analisadas, os modelos apresentaram limitações quanto ao poder preditivo, reforçando a necessidade de cautela na extrapolação desses resultados.

De forma geral, a heterogeneidade espacial e vertical dos atributos do solo em Sorocaba é resultado da interação entre fatores naturais, como a evolução pedogenética, e antrópicos, como o uso e ocupação desordenados do solo. Esses achados reforçam a importância de estratégias de manejo diferenciadas, adaptadas às especificidades de cada setor da paisagem.

A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre os processos de degradação superficial em áreas urbanas e periurbanas, oferecendo subsídios técnicos para o planejamento territorial, a conservação do solo e a mitigação de riscos ambientais. Recomenda-se, para estudos futuros, a ampliação da base de dados, a inclusão de variáveis adicionais de ordem biológica e climática, além da validação das funções preditivas em diferentes contextos edáficos e geográficos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ADEDEJI, O.; TOPE-AJAYI, O.; ABEGUNDE, O. Avaliação e previsão de mudanças no status da Reserva Florestal de Gambari, Nigéria usando técnicas de sensoriamento remoto e GIS. **Journal of Geographic Information System**, v. 7, p. 301-318, 2015.
- AGUIAR, T. C. de; SPLETOZER, A. G.; SILVEIRA, L. J. da; BARBOSA, R. A.; DIAS, H. C. T. **Escoamento superficial em diferentes tipos e usos do solo: revisão sistemática entre 2000 e 2020**. In: Meio ambiente: gestão, preservação e desenvolvimento sustentável. Editora e-Publicar, 2021. p. 435–452.
- AL-SHAMMARY, A. A. G.; KOUZANI, A. Z.; KAYNAK, A.; KHOO, S. Y.; NORTON, M.; GATES, W. Soil bulk density estimation methods: a review. **Pedosphere**, v. 28, p. 581–596, 2018.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, E. A. C.; SAMPAIO, P. V.; LEMOS, L. S.; PASSOS, M. M. Degradação dos solos: Impactos ambientais e metodologias de análise. **Revista Territorium Terram**, v. 06, n. 08, 2023.
- ANDRADE, F. H. N. de; ALMEIDA, C. D. G. C.; ALMEIDA, B. G.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; MANTOVANELLI, B. C.; ARAÚJO FILHO, J. C. Atributos físico-hídricos do solo via funções de pedotransferência em solos dos tabuleiros costeiros de Pernambuco. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 69–86, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13600: Solo – Determinação do carbono orgânico total por oxidação a seco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- AYRES, M.; AYRES JÚNIOR, M.; AYRES, D. L.; SANTOS, A. A. S. **BioEstat: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biomédicas**. Versão 5.3. Belém, PA: Sociedade Civil Mamirauá, 2007. 324 p. Disponível em: <https://www.mamiraua.org.br/downloads/programas/>. Primeiro acesso em: 18 set. 2023.
- BANWART, S. A.; NIKOLAIDIS, N. P.; ZHU, Y. G.; PEACOCK, C. L.; SPARKS, D. L. Soil functions: connecting earth's critical zone. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, p. 333-359, 2019.
- BENIAICH, A.; OTTEN, W.; SHIN, H.-C.; COOPER, H. V.; RICKSON, J.; SOULAIMANI, A.; EL GHAROUS, M. Evaluation of pedotransfer functions to estimate some of soil hydraulic characteristics in North Africa: A case study from Morocco. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, 2023.

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 788 p.

BILLINGS, S. A.; LAJTHA, K.; MALHOTRA, A.; BERHE, A. A.; DEGRAAFF, M.-A.; EARL, S.; FRATERRIGO, J.; GEORGIOU, K.; GRANDY, S.; HOBBIE, S. E.; MOORE, J. A. M.; NADELHOFFER, K.; PIERSON, D.; RASMUSSEN, C.; SILVER, W. L.; SULMAN, B. N.; WEINTRAUB, S.; WIEDER, W. Soil organic carbon is not just for soil scientists: measurement recommendations for diverse practitioners. **Ecological Applications**, v. 31, n. 3, 2021.

BISOLO, A.; RODRIGUES, M. F.; CONCEIÇÃO, F. G.; PELLEGRINI, A. Spatial variability and correlation between soil physical properties under no-tillage with and without agricultural terraces. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, spe1, 2024.

BLUM, W. E. Functions of soil for society and the environment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 4, n. 3, p. 75-79, 2005.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

CRUZ, D. L. S.; VALE JÚNIOR, J. F.; NEVES, L. T. C.; CARVALHO, L. B.; AHOUANGBONOU, O. R. K. Soil physical quality: a comprehensive analysis of its importance for agricultural production. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 18, p. 1-23, 2024.

BUENO, L. O.; ANJINHO, P. S.; BOLLELI, T. M.; BARBOSA, M. A. G. A.; MAUAD, F. F. Erosion susceptibility mapping in the Central-Eastern Region of São Paulo in the last few decades. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, artigo 927, 2022.

CAMARGO, O. A. DE; MONIZ, A.C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2009.

CAPUTO, H.P.; CAPUTO, A.N. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. Rio de Janeiro: LTC, 272 p., 2016.

CASAGRANDE, A. Classification and identification of soils. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 113, p. 901-930, 1948.

CHEN, S.; CHEN, Z.; ZHANG, X.; LUO, Z.; SCHILLACI, C.; ARROUAYS, D.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; SHI, Z. European soil bulk density and organic carbon stock database using machine learning based pedotransfer function. **Earth System Science Data Discussions**, jan. 2024.

COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; AMARAL, A. J.; VASQUES, G. M.; MANSILLA BACA, J. F.; DART, R. O.; PEDREIRA, J. P. N. C. **Erodibilidade dos solos do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, Ministério da Agricultura e Pecuária, 2024.

COGO, F. D.; PAIVA, M. F. de; SILVA, L. F.; SOUSA, L. F. de. Estoque de carbono orgânico e atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-floresta com eucalipto no Cerrado Mineiro. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, 2022.

CONCHA, A.; ALVAREZ-ICAZA, L. Parameter and state estimation of shear buildings using spline interpolation and linear integral filters. **Shock and Vibration**, v. 2018, 21 p., 2018.

CORNÉLIO, V. L.; COMPAGNON, A. M.; PEREIRA FILHO, W. J.; SILVEIRA, M. G.; CINTRA, P. H. M. Métodos de posicionamento para a determinação da variabilidade espacial de atributos do solo. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 24, n. 3, 2021.

COSTA, E. S. da; LEITE, E. F.; ALVES, R. E.; CUNHA, E. R. da. Análise da erosividade da chuva e da declividade do relevo na bacia hidrográfica do Ribeirão Vermelho-MS. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 47, p. 119–137, 2025.

DAS, B.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DEMATTÊ, J. A. M.; BORTOLETTO, M. A. M.; VASQUES, G. M.; RIZZO, R. Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia**, v. 70, n. 3, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1091338/1/Densidadesolo.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 23 maio 2025.

EMMERT, F.; PEREIRA, R. S. Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais: estudo de caso. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 601-613, 2016.

FASIKA, A.; MOTUMA, T.; GIZAW, T. Land use land cover change trend and its drivers in Somodo Watershed South Western, Ethiopia. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 2, p. 102–117, 2019.

FERNANDES, R. L. G. **Análise geológica e ambiental dos processos erosivos em Aparecida de Goiânia (GO)**. 2023. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, São Carlos, 2023.

FERREIRA, V. A. M. F.; MARASCA, I.; SILVA JÚNIOR, J. F.; PAIVA FILHO, S. V.; TAVARES, R. L. M. Penetrometers to determine the resistance to penetration in Oxisol in pastureland in the Cerrado. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v. 12, n. 1, p. 40-47, jul. 2022.

FILIZOLA, H. F.; ALMEIDA FILHO, G. S. de; CANIL, K.; SOUZA, M. D. de; GOMES, M. A. F. Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos. Jaguariúna, SP: **Embrapa Meio Ambiente**, 2011.

FRANCISCO, P. R. M.; SOUSA, J. H. S. de; RIBEIRO, G. N. do; SILVA, J. N.; RODRIGUES, R. C. M. Modeling by Ordinary Krigage in Determining Rainfall in Paraíba State Between 2000 and 2022. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 14, n. 1, p. 911–920, 2024.

GODOI, R.; RODRIGUES, D. B. B.; BORRELLI, P.; OLIVEIRA, P. T. S. Mapa de erodibilidade do solo de alta resolução do Brasil. **Science of the Total Environment**, v. 781, p. 146673, 2021.

GUEDES, T. A.; MARTINS, A. B. T.; ACORSI, C. R. L.; JANEIRO, V. **Estatística Descritiva**. Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo (IME-USP), 2023.

HASAN, M. F.; ABUEL-NAGA, H. Determinação do limite de liquidez e limite de plasticidade de solos argilosos por condução elétrica de superfície e espessura de camada dupla difusa. **Minerais**, Basel, v. 14, n. 3, p. 210, 2024.

HERNANI, L. C. **Controle da erosão**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2021.

HUANG, X.; WANG, K. R.; ZOU, Y. W.; CAO, X. C. Development of global research on soil erosion at the watershed scale: a bibliometric analysis of the last decade. **Environmental Science and Pollution Research Int.**, v. 28, n. 10, p. 12232-12244, 2021.

IKEOKA, H. I. **Análise estatística de experimentos realizados para o melhoramento de um solo da formação Guabirotuba com o uso de cal e cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Base cartográfica contínua do estado de São Paulo: escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 23 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **População**, 2022b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sorocaba/panorama>. Acesso em: 05 fev. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil: 1991–2020**. Brasília: INMET, 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 22 maio 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11272:2017 – Soil quality – Determination of dry bulk density**. Geneva: ISO, 2017.

JACKSON, R. B.; LAJTHA, K.; CROW, S. E.; HUGELIUS, G.; KRAMER, M. G.; PINEIRO, G. The ecology of soil carbon: Pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**, v. 48, p. 419–445, 2017.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KEANE, S.; YANG, J.; PORTER, J.; ATKINSON, J. D. Relationship between Object Sentimentality and Hypothetical Distance to Climate Change. **Journal of Environmental Engineering**, v.151, n.1, 2025.

KEESSTRA, S. D.; BOUWMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDÀ, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J. N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, v. 2, n. 2, p. 111-128, 2016.

KORTZ, A. R.; GONÇALVES, C. N.; CAMPOS, M. C. R.; GIROTTO, E.; GUERRA, A. M. N. M.; SOUZA, M. C. S. Wood vegetation in Atlantic rain forest remnants in Sorocaba (São Paulo, Brazil). **Check List**, v. 10, n. 2, p. 344–354, 2014.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v. 47, p. 583–621, 1952.

LI, K.; YANG, J.; WANG, J.; WANG, Z.; ZENG, Y.; BORRELLI, P.; HUBACEK, K.; HU, Y.; XU, B.; FANG, N.; ZENG, C.; ZHOU, Z.; SHI, Z. Human-altered soil loss dominates nearly half of water erosion in China but surges in agriculture-intensive areas. **Science Direct**, v. 7, n. 11, p. 2008-2018, 2024.

LIU, J.; GAO, G.; WANG, S.; JIAO, L.; WU, X.; FU, B. The effects of vegetation on runoff and soil loss: multidimensional structure analysis and scale characteristics. **Journal of Geographical Sciences**, v. 28, n. 1, p. 59–78, 2018.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. 3^a. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015, 560 p.

MACHADO-HESS, E. S. **Atlas escolar de Sorocaba. Secretaria de Educação**, 2020. Disponível em: <http://educacao.sorocaba.sp.gov.br>. Acesso em: 20 abril 2023.

MALHOTRA, A.; TODD-BROWN, K.; NAVE, L. E.; BATJES, N. H.; HOLMQIST, J. R.; HOYT, A. M.; IVERSEN, C. M.; JACKSON, R. B.; LAJTHA, K.; LAWRENCE, C.; VINDUSKOVA, O.; WIEDER, W.; WILLIAMS, M.; HUGELIUS, G.; HARDEN, J. The landscape of soil carbon data: Emerging questions, synergies and databases. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 43, p. 707–719, 2019.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. D. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. D. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomica**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomias – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. **MapBiomias**, 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 19 abr. 2024.

MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MAYER, A.; HAUSFATHER, Z.; JONES, A. D.; SILVER, W. L. The potential of agricultural land management to contribute to lower global surface temperatures. **Science Advances**, v. 4, n. 8, 2018.

MELO, F. L.; SIMÃO, J. B. P.; CAIADO, M. A. C.; RANGEL, O. J. P. Vegetação como instrumento de proteção e recuperação de taludes. **Revista Verde**, v. 8, n. 5, p. 116-124, Edição Especial, dez. 2013.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; WADOUX, A. M. J.-C.; AKOEB, E. N.; SABRINA, T. Precocious 19th century soil carbon science. **Geoderma Regional**, v. 22, set. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352009420300559>. Acesso em: 23 out. 2024.

MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. **Land Use Policy**, v. 100, 2021.

MORAIS, A. L. S. de; MARTINS, D. A.; ANDRADE, L. M.; PEREIRA, R. S. F.; OLIVEIRA, T. M. Análise granulométrica: uma revisão bibliográfica. **Journal of Exact Sciences – JES**, v. 28, n. 1, p. 5-10, 2021.

MUNSELL, A.H. **A color notation**. Boston: G. H. Ellis, 1905. 90p.

NEEDELMAN, B. A. What Are Soils? **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 3, p. 2, 2013.

NIEDOBA, T.; SUROWIAK, A.; HASSANZADEH, A.; KHOSHDAST, H. Evaluation of the Effects of Coal Jigging by Means of Kruskal–Wallis and Friedman Tests. **Energies**, v. 16, n. 4, 2023.

NUNES, N.; GUANDIQUE, M. E. G. O processo de planejamento e gestão de recursos hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Sorocaba e Médio Tietê. **Revista de Gestão da Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 19, 2022.

O'KELLY, B. C. Theory of the liquid and plastic limits for fine-grained soils, test methods and outlook. **Geotechnical Survey**, v. 11, n. 1, p. 43–61, 2024.

OKOBA, B. O.; STERK, G. Farmers' identification of erosion indicators and related erosion damage in the Central Highlands of Kenya. **Catena**, v. 65, 2006.

OLIVEIRA, E. L.; SALLES, M. T. Relações entre o subsolo urbano e mudanças climáticas em diferentes bairros do Rio de Janeiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; ROBINSON, D. FAO calls for actions to reduce global soil erosion. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 25, p. 789-790, 2020.

PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; BALLABIO, C.; BORRELLI, P.; ALEWELL, C. Erodibilidade do solo na Europa: um conjunto de dados de alta resolução baseado no LUCAS. **Science of the Total Environment**, v. 479, p. 189–200, 2014.

PATHAN, S. A.; SIL, B. Prioritization of soil erosion prone areas in upper Brahmaputra River Basin up to Majuli River Island. **Geocarto International**, v. 35, p. 1–19, 2020.

PEREIRA, M. C. S.; MARTINS, J. R. S.; NOGUEIRA, F. F.; MAGALHÃES, A. A. B.; SILVA, F. P. Melhoria da qualidade da água de rios urbanos: novos paradigmas a explorar – Bacia hidrográfica do rio Pinheiros em São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 577-590, 2021.

PESSOA, T. N.; BATISTA, A. M.; SOUSA, R. N.; LIBARDI, P. L. Movement of water and solutes in agricultural soils. In: **Strategic Tillage and Soil Management – New Perspectives**. London: IntechOpen, 2024a.

PESSOA, T. N.; BOVI, R. C.; NUNES, M. R.; COOPER, M.; UTEAU, D.; PETH, S.; LIBARDI, P. L. Clay mineral composition drives soil structure behavior and the associated physical properties in Brazilian Oxisols. **Geoderma Regional**, v. 38, art. e00837, p. 1–10, 2024b.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, L. A. da S. R.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, O. A. Q.; SOUZA, R. S.; MORAIS, I. de S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F. da; MARTELLETO, L. A. P. Organic carbon and soil aggregation in banana planting areas under different cropping densities. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 16244–16261, 2020.

POESEN, J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 1, p. 64-84, 2018.

PRADO, H. do; PRADO, T. A. B. do. **Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais**. 6. ed. Piracicaba: Instituto Agronômico de Campinas, 2022.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Open-Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 20 jun. 2023.

RAJARATHINAM, A.; RAMJI, M. Discriminant analysis for soil attributes. **International Journal of Agricultural and Statistical Sciences**, v. 19, supl. 1, p. 921-931, 2023.

RENCHE, A. C.; CHRISTENSEN, W. F. **Methods of multivariate analysis**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning**. USDA, 1997.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 2, p. 185-196, 2018.

RIBEIRO, T. G.; BOAVENTURA, G. R.; CUNHA, L. S.; PIMENTA, S. M. Estudo da qualidade das águas por meio da correlação de parâmetros físico-químicos, bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns. **Geochimica Brasiliensis**, v. 30, n. 1, p. 84-94, 2016.

ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118 p. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2017/11/Livro_Solos1.pdf. Acesso em: 23 maio 2025.

RITTER, M. G.; MENEGOTTO, M. L.; COSTELLA, M. F.; PAVAN, R. C.; PILZ, S. E. Analysis of soil-structure interaction in buildings with deep foundation. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 2, 2020.

ROY, S.; BHALLA, S. K. Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures. **Resources and Environment**, v. 7, n. 4, p. 103-109, 2017.

SALOMÃO, F. S.; SILVA, A. M. D. Predicting soil erosion and assessing quality indicators in two Brazilian watersheds: subsidy for territorial planning. **Geocarto International**, v. 37, n. 17, p. 4932–4951, 2021.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v. 114, p. 9575–9580, 2017.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, 2010.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094002/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 25 maio 2025.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. rev. e ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

SCAGLIANTI, C. A. C. **Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob diferentes coberturas em áreas de restauração do PNMCBIO**, Sorocaba/SP. 2022. 102 f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2022.

SCHARLEMANN, J. P. W.; TANNER, E. V. J.; HIEDERER, R.; KAPO, V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v. 5, p. 81–91, 2014.

SHOJAEZADEH, S.; AL-WARDY, M.; NIKOO, M.; MOOSELU, M.; ALIZADEH, M.; ADAMOWSKI, J.; MORADKHANI, H.; ALAMDARI, N.; GANDOMI, A. Soil erosion in the United States: Present and future (2020–2050). **Catena**, v. 242, n. 108074, 2024.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A. Importância das funções de pedotransferência no estudo das propriedades e funções hidráulicas dos solos do Brasil. **Multi-Science Journal**, v. 1, n. 5, p. 31–37, 2016.

SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; ANDRADE, C. A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. **Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções**. Brasília, DF: Embrapa, 2023.

SIMIONATTO, H. H.; SILVA JUNIOR, A. X.; SANTOS, A. P.; ARANTES, L. T.; SILVA, D. C. C. Sensoriamento remoto aplicado na caracterização do uso e ocupação do solo em sub-bacia hidrográfica no oeste paulista, São Paulo. **Anais do I Congresso Brasileiro de Agropecuária**, 2024.

SMAGIN, A. A physically based model for the entire soil water retention curve. **Soil Science Society of America Journal**, v. 89, n. 2, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.70054>. Acesso em: 25 maio 2025.

SMITH, P.; SOUSSANA, J.-F.; ANGERS, D.; SCHIPPER, L.; CHENU, C.; RASSE, D. P.; BATJES, N. H.; VAN EGMOND, F.; MCNEILL, S.; KUHNERT, M.; ARIAS-NAVARRO, C.; OLESEN, J. E.; CHIRINDA, N.; FORNARA, D.; WOLLENBERG, E.; ÁLVARO-FUENTES, J.; SANZ-COBENA, A.; KLUMPP, K. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Global Change Biology**, v. 26, p. 219–241, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>. Acesso em: 23 fev. 2025.

SOARES, A. K. M.; CRESTANA, S.; FERREIRA, R. R. M.; RODRIGUES, V. G. S. Assessment of the impact of conservation measures by modeling soil loss in Minas Gerais, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 358, 2024.

SOROCABA (Município). **Inventário da oferta turística: 2024–2027**. Sorocaba: Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Turismo, 2024a. 398 p. Disponível em: <https://desenvolvimentoeconomico.sorocaba.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/03/inventario-2024-2027-finalcompressed.pdf>. Acesso em: 23 maio 2025.

SOROCABA (Município). **Relatório de caracterização do município**. Sorocaba: Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Urbano, 2024b. Disponível em: <https://planejamento.sorocaba.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/10/7-relatorio-de-caracterizacao-rev-06set24-final.pdf>. Acesso em: 25 maio 2025.

SOUSA, R.; TIMM, L. C.; GUEVARA, M. D. Soil texture: concepts and applications in sandy soils. **Revista Brasileira de Engenharia Sustentável**, v. 4, n. 1, p. 31-37, jul. 2017.

SOUZA, C. B. de. Limites e possibilidades de aplicações de modelos digitais de elevação gerados a partir de produtos obtidos por sensores remotos nos cálculos de volumes de terraplenagem. **Revista TCU**, Brasília, v. 49, n. 136, p. 132-165, jul./dez. 2019.

SOUZA, G. O. de; VILARINHO, B. de S.; MAGALHÃES, B. C. de L.; MACEDO, R. de M.; CARVALHO, F. H. da S.; SILVA, H. P.; LEAL, L. de S.; GOMES, R. S.; SILVA, R. de A. A. da. Análise técnica dos problemas de drenagem urbana na rua Rio Grande do Norte de Açailândia – Maranhão considerando a declividade da via e seu impacto na drenagem da água em períodos chuvosos. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, jan. 2023.

SOUZA, N. C. **Geotecnologias na análise da suscetibilidade e risco de processos erosivos em áreas de entorno de linhas férreas. Estudo de caso: Malha Paulista - SP (Bacia do Tietê - Sorocaba)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American Journal of Psychology**, v. 15, p. 72–101, 1904.

STOKES, G. G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 9, p. 8–106, 1851.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em Excel-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, jun. 2014.

TEIXEIRA, L.; HECK, D.; NOMURA, E.; VIEIRA, H.; DITA, M. Soil attributes, plant nutrition, and Fusarium wilt of banana in São Paulo, Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v. 46, p. 443–454, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00428-2>. Acesso em: 25 maio 2025.

TRALDI, W. A.; MARQUES, S. F.; PITOMBO, C. S.; SOUSA, P. B. de; MELO, R. A. de. Avaliação da infraestrutura cicloviária e interpolação espacial de seus indicadores de qualidade: uma abordagem baseada em análise hierárquica e geoestatística. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 4, p. 968–984, 2022.

TREJO-ALONSO, J.; QUEVEDO, A.; FUENTES, C.; CHÁVEZ, C. Evaluation and development of pedotransfer functions for 6, 2020.

UNITED NATIONS (UN). **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. New York: United Nations, 2015.

UNITED STATES NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (USDA). **Soil quality indicators – Bulk density**. Washington, D.C.: USDA, 2008. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/Soil%20Quality-Indicators-Bulk%20Density.pdf>. Acesso em: 04 maio 2025.

URBAN, R. C. **Fragilidade ambiental, qualidades do solo, da água e ocupação urbana na microbacia do Córrego Lavapés – Sorocaba/SP**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, FEB, Bauru, 140 p., 2011.

VAN LOOY, K.; BOUMA, J.; HERBST, M.; KOESTEL, J.; MINASNY, B.; MISHRA, U.; MONTZKA, C.; NEMES, A.; PACHEPSKY, Y. A.; PADARIAN, J.; SCHAAP, M. G.; TÓTH, B.; VERHOEF, A.; VANDERBORGHT, J.; VAN DER PLOEG, M. J.; WEIHERMÜLLER, L.; ZACHARIAS, S.; ZHANG, Y.; VEREECKEN, H. Pedotransfer functions in Earth system science: challenges and perspectives. **Reviews of Geophysics**, v. 55, n. 4, p. 1199-1256, 2017.

VASCONCELOS, V. V.; MOMM, S.; CANIL, K.; NOGUEIRA, F. R. Gestão de risco de desastres e análise de bacias hidrográficas: a carta geotécnica de aptidão à urbanização de Itapevi–SP, Brasil. **Cadernos Metr  pole**, v. 20, n. 42, p. 371–398, 2018.

VÁZQUEZ-GUILLÉN, F.; AUVINET-GUICHARD, G. Fragilidade estrutural de componentes sob incertezas não gaussianas correlacionadas. **Pesquisa e Tecnologia em Engenharia**, v. XIX, n. 1, p. 101-112, jan.-mar. 2018.

VELOSO, M. F.; RODRIGUES, L. N.; OTTONI, M. V. Funções de pedotransferência para a estimativa de parâmetros físico-hídricos do solo do bioma Cerrado. In: **AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO: subsídios para o desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, cap. 13, p. 400–418, 2024.

WANG, Y.; JIN, J.; ZHANG, Q.; ZHANG, M.; LIN, X.; WANG, X.; LIN, P. Accuracy of Non-Destructive Estimation of Length of Soil Nails. **Buildings**, v. 13, 2023.

WEBER, T. K. D.; WEIHERM  LLER, L.; NEMES, A.; BECHTOLD, M.; DEGRÉ, A.; DIAMANTOPOULOS, E.; FATICHI, S.; FILIPOVI  , V.; GUPTA, S.; HOHENBRINK, T. L.; HIRMAS, D. R.; JACKISCH, C.; DE JONG VAN LIER, Q.; KOESTEL, J.; LEHMANN, P.; MARTHEWS, T. R.; MINASNY, B.; PAGEL, H.; VAN DER PLOEG, M.; SHOJAEZADEH, S. A.; SVANE, S. F.; SZAB  , B.; VEREECKEN, H.; VERHOEF, A.; YOUNG, M.; ZENG, Y.; ZHANG, Y.; BONETTI, S. Hydro-pedotransfer functions: a roadmap for future development. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 28, n. 14, p. 3391-3433, 2024.

WEINTRAUB, S. R.; FLORES, A. N.; WIEDER, W. R.; SIHI, D.; CAGNARINI, C.; GONÇALVES, D. R. P.; YOUNG, M. H.; LI, L.; OLSHANSKY, Y.; BAATZ, R.; SULLIVAN, P. L.; GROFFMAN, P. M. Leveraging environmental research and observation networks to advance soil carbon science. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 124, p. 1047–1055, 2019.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 1978.

WILLIAMS, J. R.; RENARD, K. G.; DYKE, P. T. A new method for assessing the effect of erosion on productivity – The EPIC model. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 38, n. 5, p. 381–383, set./out. 1983.

ZHAO, T.; ZHANG, X.; GAO, Y.; MI, J.; LIU, W.; WANG, J.; JIANG, M.; LIU, L. Accuracy and consistency assessment of six fine-resolution global land cover products using a novel stratified random sampling validation dataset. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2285, 2023.

ZHANG, Q. On relationships between Chatterjee’s and Spearman’s correlation coefficients. **arXiv preprint arXiv:2302.10131**, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2302.10131>. Acesso em: 4 mar. 2025.

APÊNDICE A

Tabela A.1. Coordenadas x e y dos pontos amostrais, obtidas por GPS (sistema de projeção UTM, datum SIRGAS 2000), cobertura do entorno (CE), observações de campo, indicadores de erosão e valores de resistência do solo, determinados por meio do penetrômetro.

[illegible]

21	247305	7395499	Beira de Estrada - Gramínea	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0,9
22	258527	7406874	Gramínea - área urbana ao redor - queimada recente - horizonte A e B bem definido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,6	5,4
23	258506	7405949	Fragmento pequeno de mata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4,2	7,1
24	259280	7406094	Mata cerrado - subsolo rochoso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,2	3,3
25	259661	7405579	Gramínea - a partir de 0,5 m estrutura laminar pronunciada - rocha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2,7	11,1
26	260581	7406403	Mata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,7	3,4
27	256009	7405659	Pasto Malformado - Antiga Construção	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,3	13,0
28	254128	7407593	Mata - Indústria Próxima - 1,10m impenetrável	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,5	4,6
29	255975	7409259	Gramínea Cerrado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	5,1	5,9
30	256227	7411307	Plantação - Cultura Anual - Marcas de Trator	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	2,5
31	257745	7409697	Terreno Urbano com Solo Exposto	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	6,2	4,8
32	253996	7404823	Solo Exposto	4	5	2	2	5	0	0	0	0	0	5	7	4,3
33	253001	7403682	Estacionamento da UNIP - Borda de Fragmento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1	7,3
34	255015	7412564	Floresta Semidecidual	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	3,6	8,3
35	254783	7413331	Plantação de Sorgo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10,0
36	254271	7412886	Solo Exposto - Pátio Estacionamento	5	0	0	0	2	0	0	0	0	5	5	4,3	7,0
37	252118	7413462	Plantação de Sorgo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,1	2,7
38	249216	7413647	Pasto Bem Conservado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,6	11,5
39	247001	7411736	Solo Exposto - Obra em andamento (Indicadores de erosão mais pronunciados no horizonte subsuperficial)	5	0	4	0	0	0	0	0	0	3	0	5,2	5,8

40	246869	7410186	Agrícola - canavial	0	0	2	0	0	0	0	0	0	5	4	3,8	7,9
41	246860	7408974	Mata Solo Gley - Hidromórfico - cinza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	4,3
42	246475	7407835	Gramínea Degradada	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	8,1	3,7
43	246211	7404465	Mata Ciliar atrás de uma residência - desmoronamento (Erosão aparente sem nenhum indicador)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,5	4,0
44	243814	7404783	Solo Exposto com trabalho de trator	0	2	5	0	0	0	0	0	0	5	1	11,2	2,7
45	242415	7407906	Pasto - 50 cm impenetrável	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,2	7,1
46	241717	7412696	Pasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,4	4,1
47	261900	7396152	Transição Reflorestamento com gramínea	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	7,4	4,1
48	261414	7396125	Mata-beira de rua de terra semidecidual (no ponto não há erosão, mas na rua sim)	0	0	4	0	0	0	0	0	0	3	3	6,5	4,6
49	242578	7389716	Cerrado - UFSCAR	0	4	2	0	0	0	0	0	0	4	1	7	4,3
50	245099	7389691	Área periférica lote com gramínea esparsa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,6	8,3
51	245310	7396749	Praça Urbana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,3	4,8
52	243990	7397750	Borda de fragmento bem degradado - Leucena	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5,3	5,7
53	243073	7399721	Mata semidecidual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,7	3,9
54	244560	7399638	Terreno Urbano	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3,7	8,1
55	247180	7399533	Terreno Urbano - Gramínea (Possibilidade de ser aterro)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5
56	250615	7399770	Transição entre gramínea e solo exposto próximo Rio Sorocaba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	4,3
57	249170	7404068	Pasto - Loteamento Queimado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3,5	8,6

[illegible]

Tabela A.2. Parâmetros físicos, mecânicos e geotécnicos para o horizonte superficial.

Ponto	Densidade do solo (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)	Granulometria				Consistência			Cor
			Areia grossa + média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)	
1	1.55	1.00	43.40	23.80	1.20	8.13	14.38	—	—	Vermelho-amarelado
2	—	3.29	60.35	2.22	0.67	1.95	40.19	35.58	4.60	Bruno
3	1.37	1.49	26.75	8.74	3.27	1.64	26.14	—	—	Bruno-avermelhado
4	1.29	0.21	30.23	11.48	1.01	4.45	21.30	11.10	10.20	Bruno-avermelhado-claro
5	1.38	1.73	41.50	3.60	0.51	3.05	41.57	35.42	6.15	Bruno-amarelado-claro
6	1.47	0.40	34.52	6.86	4.46	2.99	37.32	—	—	Branco
7	1.20	1.61	34.22	3.08	2.08	2.54	37.80	—	—	Bruno-claro
8	—	0.80	41.39	3.20	0.89	1.74	22.28	20.13	2.15	Cinza
9	—	2.44	42.93	4.99	2.44	4.46	31.73	30.45	1.28	Bruno-acinzentado
10	—	4.68	48.01	24.12	1.03	10.20	18.94	—	—	Bruno-forte
11	1.23	3.30	37.83	2.21	0.16	1.58	25.89	23.27	2.63	Bruno-escuro
12	1.31	2.39	41.80	1.68	1.05	1.56	37.30	33.42	3.88	Bruno
13	—	7.90	45.71	3.89	1.29	4.05	26.77	24.54	2.23	Bruno-amarelado
14	1.05	6.30	44.59	8.26	1.62	3.43	28.34	25.24	3.09	Bruno-claro
15	1.03	1.81	35.36	4.06	1.87	3.77	27.25	—	—	Bruno
16	1.04	3.25	54.71	5.52	1.76	4.71	30.40	—	—	Bruno-avermelhado-escuro
17	—	0.34	45.86	3.99	1.82	2.48	36.11	—	—	Bruno-claro
18	1.42	1.77	32.73	2.37	1.06	1.70	31.55	29.77	1.77	Bruno-claro
19	0.95	5.17	51.43	8.73	5.10	5.70	25.06	—	—	Bruno-avermelhado-claro
20	1.43	4.94	39.72	4.03	1.32	2.60	30.84	29.78	1.06	Bruno
21	1.29	4.65	42.06	0.87	0.62	2.90	48.10	45.49	2.61	Vermelho-acinzentado
22	1.17	3.50	31.51	8.82	3.69	8.62	18.28	16.66	1.62	Bruno
23	1.10	1.97	43.68	7.27	3.99	5.27	32.50	32.28	0.21	Bruno
24	0.94	6.71	37.24	9.37	2.36	5.91	40.99	—	—	Bruno
25	1.35	3.53	34.26	7.58	1.41	3.70	26.33	—	—	Bruno-forte
26	1.36	7.46	43.33	4.42	2.29	3.59	26.98	25.72	1.26	Vermelho
27	1.30	6.19	43.61	23.38	1.41	12.99	18.45	—	—	Bruno-forte
28	0.97	10.63	50.38	14.78	1.53	6.31	30.28	—	—	Vermelho
29	1.26	0.15	58.22	16.88	0.50	5.26	13.93	—	—	Bruno-escuro
30	1.31	4.62	42.83	15.26	1.44	7.52	24.07	—	—	Amarelo-avermelhado
31	1.31	0.67	37.38	16.27	1.26	6.43	18.32	—	—	Bruno
32	1.45	8.40	28.96	17.84	1.88	7.66	21.51	20.41	1.10	Bruno

33	1.48	3.43	37.50	19.65	0.94	5.02	—	—	—	Bruno-claro
34	0.99	2.25	27.47	6.00	2.90	3.87	36.06	—	—	Bruno-forte
35	1.57	9.73	36.27	3.45	2.21	4.14	27.85	25.26	2.59	Bruno
36	1.52	1.55	44.86	6.14	0.76	5.48	24.41	20.77	3.64	Vermelho-amarelado
37	1.20	11.48	43.58	9.36	3.22	10.59	29.33	—	—	Vermelho-escuro
38	1.14	0.96	47.97	30.77	0.69	10.44	14.56	—	—	Bruno
39	1.05	3.37	27.74	11.67	0.45	6.80	20.33	17.60	2.73	Vermelho
40	1.67	5.83	12.71	0.66	0.69	1.50	28.77	25.99	2.77	Vermelho-amarelado
41	1.47	6.43	45.68	18.76	1.51	6.12	20.81	—	—	Bruno-forte
42	1.18	2.83	32.38	11.72	1.42	6.77	20.77	17.60	3.17	Bruno-amarelado
43	1.23	2.91	55.07	18.06	1.13	5.81	21.22	—	—	Bruno-forte
44	1.45	13.02	21.48	2.28	0.44	4.55	30.42	26.10	4.33	Vermelho
45	1.25	17.92	24.84	0.90	0.43	4.01	40.51	40.02	0.49	Vermelho
46	1.42	0.85	48.77	1.62	0.27	3.78	36.76	35.44	1.31	Vermelho
47	1.13	9.30	44.86	3.10	3.62	4.14	36.52	31.41	5.11	Bruno-claro
48	0.78	7.63	28.42	0.59	1.70	2.10	45.04	42.38	2.66	Bruno
49	—	18.74	39.46	0.88	0.20	3.84	44.57	36.15	8.42	Vermelho-escuro
50	1.26	8.54	36.07	2.76	1.59	4.75	38.38	37.67	0.70	Bruno-forte
51	1.24	3.53	48.35	9.18	1.07	6.55	35.95	32.47	3.48	Bruno-forte
52	1.307	0.99	25.44	16.85	2.37	9.32	28.20	25.12	3.08	Vermelho-amarelado
53	1.14	7.73	37.64	7.21	1.67	6.35	21.47	20.55	0.92	Bruno
54	1.51	6.52	30.56	2.61	3.04	2.27	35.45	29.38	6.07	Amarelo-avermelhado
55	1.56	4.88	40.60	15.66	2.57	7.20	23.51	21.01	2.50	Bruno-forte
56	1.15	2.19	34.79	9.54	4.12	5.28	24.97	—	—	Bruno-claro
57	1.69	6.24	57.66	16.10	0.72	8.85	18.76	—	—	Bruno-avermelhado
58	1.25	2.70	20.07	16.87	1.31	7.38	17.99	—	—	Bruno-amarelado-claro
59	1.46	2.14	22.24	2.08	1.71	3.06	30.43	24.12	6.31	Bruno-claro
60	0.91	8.16	30.71	2.57	0.99	3.52	27.60	25.88	1.72	Bruno-avermelhado
61	1.29	1.17	14.94	13.40	1.92	4.92	15.70	—	—	Bruno-claro-acinzentado
62	1.59	1.44	27.44	22.54	0.56	8.48	14.79	—	—	Bruno-escuro
63	1.60	2.42	22.35	20.59	1.07	6.81	10.45	—	—	Bruno-forte
64	1.28	5.28	32.31	8.17	0.76	4.69	27.40	24.61	2.79	Bruno-amarelado-escuro
65	1.62	10.89	35.98	8.07	1.77	9.53	25.96	24.96	1.00	Vermelho-amarelado

Tabela A.3. Parâmetros físicos, mecânicos e geotécnicos para o horizonte subsuperficial.

Ponto	Densidade do solo (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)	Granulometria				Consistência			Cor
			Areia grossa + média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)	
1	1.30	6.21	54.91	20.52	0.16	9.01	19.73	17.96	1.77	Vermelho-escuro
2	1.57	0.23	21.49	1.69	0.63	1.08	26.75	—	—	Bruno-amarelado-claro
3	0.94	1.42	39.23	10.34	1.70	8.46	29.48	26.23	3.25	Bruno-claro
4	1.25	5.86	28.75	9.15	4.58	5.05	33.68	31.47	2.22	Vermelho-claro-acinzentado
5	—	0.52	38.31	8.52	2.45	3.12	64.27	—	—	Cinza-rosado
6	1.19	1.34	34.51	1.68	1.11	2.09	25.28	22.16	3.12	Bruno
7	1.30	0.78	41.67	7.13	7.42	4.79	34.49	—	—	Rosado
8	1.31	5.60	49.93	1.83	0.69	4.38	43.39	39.22	4.17	Bruno-claro
9	1.13	7.52	56.73	5.14	1.38	4.96	37.57	36.04	1.53	Bruno
10	1.13	5.31	52.55	15.21	0.48	9.03	21.44	18.33	3.12	Bruno
11	1.31	5.40	56.69	8.52	0.11	12.65	26.83	24.10	2.73	Vermelho
12	0.89	1.75	50.93	3.31	2.05	3.17	33.42	—	—	Bruno
13	0.81	3.52	50.80	4.75	2.05	4.12	33.11	—	—	Bruno
14	1.00	11.30	47.20	6.25	1.72	2.85	35.86	—	—	Amarelo-avermelhado
15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	1.42	5.27	55.60	3.30	0.94	1.86	26.41	—	—	Bruno
17		3.72	34.76	2.87	0.90	1.59	30.26	—	—	Cinza-rosado
18	1.56	2.09	33.70	7.10	0.94	4.49	26.51	—	—	Bruno-forte
19	1.10	10.25	41.12	3.07	0.38	2.23	29.70	29.11	0.58	Bruno-avermelhado
20	1.50	12.05	29.01	1.74	0.69	2.25	34.33	32.20	2.13	Bruno
21	1.09	13.61	47.53	3.43	3.36	5.88	45.06	42.12	2.94	Vermelho-escuro
22	1.05	9.73	21.57	6.79	14.35	9.62	39.06	—	—	Bruno-avermelhado
23	1.54	2.92	31.13	8.58	2.06	5.39	21.82	—	—	Bruno-forte
24	—	2.52	38.29	5.77	5.88	4.11	37.94	33.83	4.11	Bruno-avermelhado
25	1.76	0.52	20.19	4.96	1.76	2.35	33.16	—	—	Bruno-forte
26	1.36	41.20	42.49	1.70	1.16	1.16	28.04	—	—	Vermelho
27	1.04	7.02	58.03	12.02	0.73	4.52	22.11	20.99	1.12	Vermelho
28	0.91	17.23	57.53	24.90	1.65	9.19	—	—	—	Bruno-forte
29	1.26	3.38	68.06	13.19	0.06	8.61	25.61	—	—	Vermelho
30	1.11	7.61	56.93	13.28	1.24	11.57	22.28	18.05	4.23	Vermelho-claro-acinzentado
31	0.95	3.96	59.76	19.57	3.07	8.65	15.07	—	—	Vermelho-claro
32	1.38	20.91	21.51	8.41	2.51	4.96	31.05	29.54	1.51	Bruno-forte
33	1.29	8.48	57.56	9.29	0.99	3.10	19.53	16.92	2.61	Bruno
34	1.31	8.24	36.64	2.88	0.64	4.85	30.61	29.91	0.69	Vermelho
35	—	5.74	60.84	5.48	3.30	4.99	32.37	28.20	4.16	Bruno-amarelado-escuro

36	1.13	5.18	57.18	14.41	2.06	18.19	28.37	—	—	Amarelo- avermelhado
37	1.19	13.18	50.66	11.17	3.23	35.27	35.32	31.11	4.20	Vermelho-escuro
38	1.10	2.73	55.90	26.04	0.08	14.67	21.64	—	—	Vermelho
39	1.32	30.38	38.05	15.31	0.85	15.78	34.11	29.44	4.67	Vermelho
40	1.24	17.26	35.74	0.73	1.40	3.99	43.74	42.54	1.20	Vermelho
41	1.24	33.60	27.14	2.55	0.53	2.53	30.24	20.67	9.57	Bruno
42	—	3.25	31.14	20.54	1.03	12.57	20.44	19.63	0.81	Amarelo- avermelhado
43	1.45	1.16	47.41	40.29	0.33	14.03	—	—	—	Amarelo-claro- acinzentado
44	1.09	12.57	34.83	6.56	0.75	16.55	39.24	—	—	Vermelho
45	1.95	16.79	47.25	2.49	4.57	12.57	38.62	34.39	4.23	Vermelho-escuro
46	1.16	2.80	54.18	28.41	0.84	11.79	17.71	—	—	Vermelho
47	—	7.91	28.32	5.90	3.94	4.33	29.43	—	—	Amarelo- avermelhado
48	1.25	2.42	42.66	9.03	8.30	5.80	31.18	30.90	0.28	Bruno- avermelhado-claro
49	1.19	18.77	11.00	0.34	0.05	2.90	31.78	30.91	0.87	Vermelho-escuro
50	1.49	15.15	46.70	2.34	1.16	5.98	39.38	37.01	2.37	Vermelho
51	1.30	10.86	52.36	6.64	0.20	10.18	29.78	28.32	1.46	Bruno
52	1.52	8.73	30.84	4.46	1.33	6.40	34.95	28.41	6.54	Vermelho
53	0.82	9.07	52.38	10.58	0.89	11.81	28.30	22.89	5.42	Bruno-forte
54	1.45	22.78	16.68	1.42	1.58	3.19	41.17	39.56	1.61	Vermelho
55	0.97	1.04	38.22	14.23	1.85	7.58	20.53	—	—	Bruno-avermelhado
56	1.61	7.47	34.25	5.06	0.86	7.05	27.81	24.33	3.48	Vermelho- amarelado
57	1.50	12.44	64.36	10.78	0.24	9.33	25.62	20.96	4.66	Vermelho
58	1.45	17.14	19.67	4.44	1.16	3.95	31.28	29.77	1.51	Vermelho
59	0.94	9.65	11.29	1.07	1.31	2.13	35.04	34.38	0.65	Amarelo- avermelhado
60	1.26	11.79	41.21	9.47	1.06	10.55	25.08	22.79	2.30	Bruno- avermelhado-escuro
61	1.46	11.82	25.12	13.84	2.82	8.37	26.39	25.48	0.91	Vermelho- acinzentado
62	1.71	6.76	45.57	22.50	1.16	10.71	21.36	21.10	0.26	Vermelho
63	1.19	9.49	30.12	10.76	0.71	10.39	34.77	31.25	3.52	Vermelho
64	1.30	5.94	48.01	12.84	0.78	9.84	26.77	18.91	7.86	Vermelho
65	0.89	14.99	33.00	3.32	1.02	5.98	32.82	27.56	5.27	Vermelho

Tabela A.4. Parâmetros hidrológicos e ecológicos para o horizonte superficial.

<i>Ponto</i>	<i>COT</i> (g/kg)	<i>K_{EPIC}</i> (t ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	<i>Ponto</i>	<i>COT</i> (g/kg)	<i>K_{EPIC}</i> (t ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
1	18,52	0,0149	34	32,67	0,0533
2	27,76	0,0194	35	56,16	0,0390
3	15,88	0,0239	36	30,32	0,0122
4	22,60	0,0182	37	96,92	0,0406
5	23,14	0,0424	38	22,07	0,0064
6	24,81	0,0746	39	30,44	0,0077
7	38,28	0,1017	40	48,75	0,0222
8	28,42	0,0195	41	23,48	0,0206
9	20,07	0,0392	42	29,79	0,0222
10	23,24	0,0113	43	22,94	0,0141
11	50,91	0,0041	44	88,12	0,0097
12	40,68	0,0233	45	62,54	0,0097
13	26,57	0,0220	46	20,86	0,0049
14	18,70	0,0274	47	36,20	0,0564
15	35,99	0,0342	48	40,91	0,0388
16	31,37	0,0262	49	98,63	0,0039
17	23,70	0,0331	50	39,18	0,0282
18	15,08	0,0249	51	28,00	0,0154
19	51,33	0,0661	52	29,41	0,0340
20	37,07	0,0259	53	35,17	0,0262
21	61,52	0,0126	54	45,95	0,0603
22	19,32	0,0533	55	28,67	0,0349
23	46,12	0,0577	56	24,14	0,0625
24	38,52	0,0363	57	29,45	0,0080
25	67,34	0,0259	58	12,21	0,0215
26	49,40	0,0387	59	31,61	0,0384
27	14,95	0,0156	60	49,59	0,0205
28	144,79	0,0206	61	18,56	0,0370
29	22,28	0,0063	62	20,45	0,0081
30	47,11	0,0197	63	22,39	0,0171
31	23,30	0,0187	64	42,15	0,0139
32	42,68	0,0276	65	31,97	0,0253
33	23,18	0,0147			