

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA**

**JÉSSICA RAFAELA DA COSTA**

**Estruturas pedogenéticas em solos construídos e seus reflexos sobre a  
condutividade hidráulica**

Versão corrigida

**São Paulo**

**2023**

JÉSSICA RAFAELA DA COSTA

**Estruturas pedogenéticas em solos construídos e seus reflexos sobre a condutividade  
hidráulica**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração: Geografia Física - Estudos interdisciplinares em Pedologia e Geomorfologia.

Orientadora: Profa. Dra. Sheila Ap. C. Furquim

Versão corrigida

São Paulo

2023



**ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA DISSERTAÇÃO/TESE**

**Termo de Anuência do (a) orientador (a)**

**Nome do (a) aluno (a): Jéssica Rafaela da Costa**

**Data da defesa: 17/07/2023**

**Nome do Prof. (a) orientador (a): Sheila Aparecida Correia Furquim**

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento ao Sistema Janus e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 15/09/2023

---

**(Assinatura do (a) orientador (a))**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação  
Serviço de Biblioteca e Documentação  
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Ce           Costa, Jéssica Rafaela da  
              Estruturas pedogenéticas em solos construídos e  
              seus reflexos sobre a condutividade hidráulica /  
              Jéssica Rafaela da Costa; orientadora Sheila  
              Aparecida Correia Furquim - São Paulo, 2023.  
              180 f.

Tese (Doutorado)- Faculdade de Filosofia, Letras e  
Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Geografia. Área de concentração:  
Geografia Física.

1. Solos. 2. Pedologia. 3. Geografia Física. 4.  
Gênese de solos. 5. Solos Urbanos. I. Furquim, Sheila  
Aparecida Correia, orient. II. Título.



Nome: COSTA, Jéssica Rafaela da

Título: Estruturas pedogenéticas em solos construídos e seus reflexos sobre a condutividade hidráulica

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

**Aprovada em:**

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

Agradeço,

À Universidade de São Paulo pela oportunidade concedida, bem como pela infraestrutura oferecida por meio de seus institutos e faculdades;

À Universidade Federal de São Paulo, à University of California, e à Université de Lorraine, instituições nas quais foram realizadas importantes etapas da pesquisa;

À Profa. Dra. Sheila Furquim, minha orientadora, pelas diretrizes e correções ao longo da pesquisa;

Ao Prof. Dr. Décio Semensatto, pelos ensinamentos a respeito dos impactos ambientais dos microplásticos.

Ao Prof. Dr. Daniel Hirmas e ao Prof. Dr. Geoffroy Séré, por terem aberto as portas de seus respectivos laboratórios para que eu pudesse desenvolver fundamentais etapas do projeto.

À gestão administrativa do Parque Estadual Villa-Lobos no ano de 2019, por permitir os trabalhos de campo e a coleta de material;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPESP), pela bolsa de doutorado “Demanda social” concedida no período de novembro de 2018 à agosto de 2020;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPESP) pela bolsa de doutorado (88882.377699/2019-01) concedida no período de setembro de 2019 à agosto de 2020;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPESP), pela bolsa de capacitação - restrita duração (88887.370756/2019-00), concedida no período de setembro de 2019 à outubro de 2019 para realização de um estágio na University of California - Riverside (USA);

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de doutorado (2019/03576-7) concedida no período de julho de 2020 à abril de 2023;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior (2021/11350-9) concedida no período de fevereiro de 2022 à julho de 2022 para realização de um estágio na Université de Lorraine (França);

## RESUMO

COSTA, Jéssica Rafaela. **Estruturas pedogenéticas em solos construídos e seus reflexos sobre a condutividade hidráulica**. 2023. 182 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

As ações humanas interferem nos processos de formação de solos no ambiente urbano. As estruturas dos solos são uma das propriedades morfológicas mais afetadas pela atividade antrópica, e sua degradação ou destruição pode afetar o ciclo hidrológico. O objetivo da pesquisa foi demonstrar o desenvolvimento de processos pedogenéticos relacionados ao desenvolvimento de agregados e estruturas e a influência dessas propriedades na condutividade hidráulica em solos modificados em ambiente urbano. Em um parque urbano, três perfis de solos foram descritos, a infiltração nos solos foi determinada e amostras foram coletadas para as seguintes análises: dimensionamento e caracterização morfológica de estruturas e poros com *Multi-stripe Laser Triangulation* (MLT); micromorfologia por lâmina delgada; condutividade hidráulica não saturada; diâmetro médio ponderado (via seca e úmida), índice de estabilidade de agregados; densidade aparente; densidade de partícula; porosidade total; granulometria; argila dispersa em água e grau de floculação;  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  e delta pH; cátions trocáveis ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ); acidez potencial; metais potencialmente tóxicos; carbono orgânico total; estoque de carbono orgânico; identificação de microplásticos por lupa binocular, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier ( $\mu$ -FTIR) e espectroscopia de  $\mu$ -Raman; composição dos argilominerais por Difração de raio-X (DRX) da fração argila e do solo total; determinação de elementos maiores ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) por Fluorescência de raio-X (FRX) da fração argila e do solo total; teor de caulinita e gibbsita por Calorimetria diferencial por varredura e Termogravimetria (DSC/TG) da fração argila; Microscopia eletrônica de varredura (MEV) integrado a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS). Os perfis de solo foram classificados de acordo com a *World Reference Base*. Os dados obtidos pelo *Multi-Lazer Triangulation* (MLT), micromorfologia e DRX foram interpretados após o processamento de imagens. Os dados químicos e físicos foram tratados por análise descritiva. Os resultados demonstram a existência de processos pedogenéticos que resultam na agregação do solo, mesmo diante da presença de materiais antrópicos. Esses materiais antrópicos são capazes de afetar os aspectos físicos, químicos e mineralógicos dos solos. Conclui-se que o solo, mesmo que previamente degradado, contribui com a infiltração e a condutividade hidráulica em ambiente urbano.

Palavras-chave: Solos urbanos. Processos pedogenéticos. Agregação do solo. Artefatos antrópicos em solo. Microplásticos no solo.

## ABSTRACT

COSTA, Jéssica Rafaela. **Pedogenetic structures in constructed soils and their effects on hydraulic conductivity**. 2023. 182 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Human actions interfere in the processes of soil formation in the urban environment, altering its morphological, physical, chemical and mineralogical characteristics. Soil structures are one of the morphological features most affected by human activity, and their degradation or destruction can affect the hydrological cycle. The objective of the research was to demonstrate the development of pedogenetic processes related to the development of aggregates and structures and the influence of these properties on hydraulic conductivity in modified soils in an urban environment. In an urban park, three soil profiles were described, soil infiltration was determined and samples were collected for the following analyses: morphological characterization of structures and pores with Multi-stripe Laser Triangulation (MLT); micromorphology; unsaturated hydraulic conductivity; weighted average diameter (dry and wet method), aggregate stability index; soil density; particle density; total porosity; particle size distribution; clay dispersed in water and degree of flocculation;  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  and  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ; exchangeable cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ); acidity; heavy metals; total organic carbon; soil organic carbon stock; microplastics presence by binocular magnifying glass, Fourier transform infrared spectroscopy ( $\mu$ -FTIR) and  $\mu$ -Raman spectroscopy; clay minerals by X-ray Diffraction (XRD);  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  by X-ray fluorescence (XRF) of the total soil and clay fraction; kaolinite and gibbsite content by Differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA) of the clay fraction; Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Soil profiles were classified according to the World Reference Base. The data obtained by Multi-Lazer Triangulation (MLT), micromorphology and XRD were interpreted after image processing. Chemical and physical data were treated by descriptive analysis. The results demonstrate the existence of pedogenetic processes as well as the aggregation process on the soil. The result includes variability of the structural arrangement, even in the presence of anthropic materials. It is concluded that the soil, even if previously degraded, contributes to infiltration and hydraulic conductivity in an urban environment.

Keywords: Urban soils. Technosol. Pedogenetic processes. Soil aggregation. Anthropogenic artefacts in soil. Microplastics in the soil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Estruturas do solo de acordo com Caputo (1988)	23
Figura 2: Potenciais presentes no solo	25
Figura 3: Movimento da água no solo	28
Figura 4: Área de estudo	35
Figura 5: Características do terreno estudado em diferentes períodos	37
Figura 6: Parâmetros extraídos pelo software ImageJ	41
Figura 7: Escaneamento dos blocos	42
Figura 8: Modelo fractal de Koch	43
Figura 9: O Minidisk Infiltrômetro (Decagon)	45
Figura 10: Etapas na determinação do DMPs e DMPu	48
Figura 11: Etapas para separação da fração argila do solo	60
Figura 12: Amostra em diálise para remoção dos sais	61
Figura 13: Os perfis de solo descritos e amostrados	66
Figura 14: Características dos solos estudados	69
Figura 15: Estruturas observadas em campo	71
Figura 16: Raízes e feições hidromórficas em subsuperfície	72
Figura 17: Materiais antrópicos em blocos subangulares	73
Figura 18: Sistema poroso e estruturas das amostras escaneadas	75
Figura 19: Frequência da área dos poros identificados	76
Figura 20: Relação entre área do poro e o diâmetro Ferret	77
Figura 21: Angulosidade dos poros	78
Figura 22: Relação entre massa e diâmetro do agregado	79
Figura 23: Exemplos de amostras escaneados com MLT	80
Figura 24: Micromorfologia do perfil 1	81
Figura 25: Micromorfologia do perfil 2	82
Figura 26: Micromorfologia do perfil 3	83
Figura 27: Utilização do infiltrômetro em campo	85
Figura 28: Comportamento hídrico em profundidade	87
Figura 29: Silhuetas de agregados	90
Figura 30: Observação em lupa de materiais retidos em peneira	90
Figura 31: Densidade aparente	92
Figura 32: Densidade de partícula	94
Figura 33: Porosidade	96
Figura 34: Distribuição granulométrica	97
Figura 35: Argila dispersa em água e em dispersante, e o grau de floculação	102
Figura 36: Resultado das análises de pH	103
Figura 37: Carbono orgânico total e matéria orgânica total	107
Figura 38: Estoque de carbono orgânico	109
Figura 39: Teores de metais potencialmente tóxicos	111
Figura 40: Microplásticos na fração areia - perfil 1	114
Figura 41: Microplásticos na fração areia - perfil 2	114
Figura 42: Microplásticos na fração areia - perfil 3	115
Figura 43: Espectros obtidos pela análise Raman	116
Figura 44: Espectros obtidos pela análise $\mu$ -FTIR	117
Figura 45: Difratoograma do perfil 1	118
Figura 46: Difratoograma do perfil 2	119
Figura 47: Difratoograma do perfil 3	120
Figura 48: Microscopia eletrônico de varredura (MEV) integrado a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) e mapeamento químico de seção do torrão do horizonte 1 do perfil 2	124
Figura 49: Mapeamento químico de lâmina delgada do horizonte 2 do perfil 3	126
Figura 50: Mapeamento químico de lâmina delgada dos horizontes 4, 5 e 6 do perfil 3	127
Figura 51: Gráfico de correlação entre variáveis físicas e químicas	129

## **LISTA DE TABELAS**

- Tabela 1: Relação entre serviços ecossistêmicos, funções e as propriedades dos solos
- Tabela 2: Categoria dos SE promovidos pelos solos modificados
- Tabela 3: Níveis de organização pedológica
- Tabela 4: Tipologias de estruturas do solo
- Tabela 5: Relação entre tamanho dos poros e fluxo hídrico
- Tabela 6: Amostragens realizadas durante os trabalhos de campo e síntese das análises realizadas
- Tabela 7: Características das estruturas identificadas
- Tabela 8: Correlação entre diâmetro Ferret e área dos poros
- Tabela 9: Infiltração e condutividade hidráulica não saturada
- Tabela 10: Diâmetro médio ponderado via seca e via úmida
- Tabela 11: Circularidade dos agregados submetidos à análise de DMPu
- Tabela 12: Resultado das análises de densidade aparente
- Tabela 13: Resultado das análises de densidade de partícula
- Tabela 14: Resultado das análises de porosidade total
- Tabela 15: Resultado das análises de granulometria
- Tabela 16: Resultado do fracionamento da areia total
- Tabela 17: Resultado das análises de argila dispersa em água
- Tabela 18: Resultado das análises de pH
- Tabela 19: Características químicas dos solos coletados no Parque Villa-Lobos
- Tabela 20: Resultado das análises de carbono orgânico total e matéria orgânica total
- Tabela 21: Estoque de carbono
- Tabela 22: Resultado das análises de teores de metais potencialmente tóxicos e valores de referência
- Tabela 23: Microplásticos nas frações areia muito grossa (2-1 mm) e areia grossa (1-0,5 mm)
- Tabela 24: Resultado das análises de teores de óxidos maiores
- Tabela 25: Teores de caulinita e gibbsita

## LISTA DE EQUAÇÕES

- Equação 1: Equação de Darcy
- Equação 2: Equação do movimento da solução em meio não saturado
- Equação 3: Equação da função De Van Genuchten
- Equação 4: Equação da condutividade hidráulica em solo não saturado
- Equação 5: Equação de sucções
- Equação 6: Equação da sorvidade
- Equação 7: Equação da condutividade hidráulica não saturada do solo
- Equação 8: Equação da dimensão fractal dos agregados
- Equação 9: Equação da infiltração
- Equação 10: Equação para determinação da condutividade hidráulica
- Equação 11: Equação do diâmetro médio ponderado seco
- Equação 12: Equação do diâmetro médio ponderado úmido
- Equação 13: Equação do índice de estabilidade de agregados
- Equação 14: Equação para determinação da massa do torrão seco
- Equação 15: Equação para determinação da massa da parafina
- Equação 16: Equação para determinação do volume da parafina
- Equação 17: Equação para determinação do volume do torrão seco
- Equação 18: Equação para determinação da densidade do solo
- Equação 19: Equação para determinação da densidade de partícula
- Equação 20: Equação para determinação da porosidade total
- Equação 21: Equação para determinação do somatório das massas na análise granulométrica
- Equação 22: Equação para determinação da massa total de areia
- Equação 23: Equação para determinação da massa total de silte
- Equação 24: Equação para determinação da massa total de argila
- Equação 25: Equação para determinação da argila dispersa em água
- Equação 26: Equação para determinação do grau de floculação
- Equação 27: Equação para determinação do delta pH
- Equação 28: Equação para determinação da soma de bases
- Equação 29: Equação para determinação da capacidade de trocas catiônicas
- Equação 30: Equação para determinação da saturação por bases
- Equação 31: Equação para determinação da saturação por alumínio
- Equação 32: Equação para determinação do carbono orgânico
- Equação 33: Equação para determinação do estoque de carbono
- Equação 34: Equação da lei de Stokes
- Equação 35: Equação para determinação da concentração de caulinita
- Equação 36: Equação para determinação da concentração de gibbsita

## SUMÁRIO

<b>1 – Introdução</b>	9
<b>2 – Objetivos e Hipóteses</b>	12
<b>3 – Revisão bibliográfica</b>	13
<b>3.1 – Características de solos modificados pelo processo de urbanização</b>	13
<b>3.2 – Formação e estabilidade da macro e micro-organização do solo</b>	18
<b>3.3 – Escoamento em meio poroso e condutividade hidráulica no solo</b>	25
<b>3.4 – Microplásticos no solo</b>	32
<b>4 – Materiais e Métodos</b>	35
<b>4.1 – Materiais</b>	35
<b>4.2 – Métodos</b>	38
<b>5 – Resultados</b>	66
<b>5.1 – Características morfológicas gerais dos solos</b>	66
<b>5.2 – Caracterização morfológica das estruturas pedogenéticas</b>	69
<b>5.3 – Escaneamento por “Multi-stripe laser triangulation (MLT)”</b>	73
<b>5.4 – Análises micromorfológicas</b>	80
<b>5.5 – Análises físicas</b>	84
<b>5.6 – Análises químicas</b>	103
<b>5.7 – Separação e análise de microplásticos</b>	113
<b>5.8 – Análises mineralógicas</b>	117
<b>5.9 – Tratamento estatístico</b>	128
<b>6 – Discussão</b>	130
<b>6.1 - Formação e estabilização de agregados nos solos estudados</b>	130
<b>6.2 - Caracterização mineralógica de solo urbano em ambiente subtropical</b>	135
<b>6.3 - Agregação do solo e a presença de artefato antrópico do tipo microplástico</b>	139
<b>6.4 - Relações entre metais potencialmente tóxicos e agregação em solos construídos</b>	142
<b>6.5 - Contribuição dos solos construídos em áreas urbanas no estoque de carbono</b>	144
<b>6.6 - Influência da formação de agregados na dinâmica hídrica</b>	146
<b>7 – Considerações finais</b>	148
<b>Referências</b>	150
<b>Apêndices</b>	167
<b>Anexos</b>	175



## 1 – Introdução

Desde os primórdios da existência humana, nossa espécie vem interagindo de forma intensa e diversa com os solos (PÉREZ *et al.*, 2016). Essa interação é marcada pelas modificações dos recursos naturais para atender às necessidades humanas. Conforme destacado por Ruellan (1985), os solos têm um papel importante em registrar as transformações realizadas pelos seres humanos no meio ambiente, preservando características relacionadas ao histórico de uso do local. Com o avanço da civilização, as cidades surgiram como centros de produção, mediação e reprodução das relações sociais (CARLOS, 2007). Em decorrência desse movimento, os solos locais passaram a sofrer transformações cada vez mais acentuadas, especialmente a partir do século XX (JENERETTE *et al.*, 2011; VASENEV *et al.*, 2019).

Os solos de áreas urbanas, normalmente modificados pelas ações humanas devido ao próprio processo de urbanização, são referenciados, por diversos autores, como solos urbanos (BURGHARDT, 1994; STROGANOVA e AGARKOVA, 1993; BULLOCK e GREGORY, 1991; CRAUL, 1985). Ações como revolvimento, compactação, corte e introdução de materiais antrópicos (resíduos domésticos, de construções e industriais, de dimensões variadas) em ambientes urbanos interferem tanto nos processos pedogenéticos gerais quanto nos específicos, modificando os solos quanto às suas características morfológicas, físicas, químicas e/ou mineralógicas. Os processos pedogenéticos gerais são definidos como adições, remoções, translocações e transformações de matéria e energia no sistema solo (SIMONSON, 1959).

A adição de artefatos antrópicos, entendidos aqui de acordo com a definição da World Reference Base (WRB) - materiais criados ou modificados pela ação humana (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022), pode ocasionar alterações nos solos. Pode, por exemplo, criar barreiras e/ou caminhos preferenciais para os fluxos hídricos, assim como pode modificar o pH dos solos (CRAUL, 1985; MADRID *et al.*, 2006), afetando os fenômenos de dispersão e flocculação dos colóides pelo desequilíbrio entre suas cargas positivas e negativas (BRADY e WEILL, 2012). Além disso, a mudança de pH tende a alterar o processo de transformação, na medida em que pode interferir na dissolução e/ou precipitação de minerais nos solos (KOHLENER *et al.*, 2003).

Os processos pedogenéticos específicos, por sua vez, são resultados da combinação dos processos gerais em situações particulares (ARNOLD, 1983). A Melanização, por exemplo, é um processo relacionado à adição de material orgânico ao solo e sua transformação em húmus, o qual tende a recobrir os constituintes minerais e escurecer determinados horizontes. A Calcificação, outro processo específico, que ocorre devido a adição e translocação de materiais

carbonáticos no perfil de solo, com possível precipitação e acúmulo em profundidade (BOCKHEIM e GENNADIYEV, 2000; BUOL *et al.*, 1973). Já a Pedalização, é definida como a formação e o desenvolvimento de agrupamentos de constituintes minerais e orgânicos com certa estabilidade, os chamados agregados ou *peds* (SIX *et al.*, 2004). Este processo assume papel de destaque na compreensão das propriedades físicas e na dinâmica hídrica dos solos, inclusive os urbanos, uma vez que sua presença e intensidade afeta significativamente o ciclo hidrológico nas cidades.

A estrutura do solo exerce função primordial na quantidade, formas e conectividade dos poros, sendo, portanto, importante na difusão de gases e líquidos (CHEN *et al.*, 2014) e, conseqüentemente, nos processos de infiltração, permeabilidade e fluxos superficiais e subsuperficiais (SCHUELER, 2000; MOREL *et al.*, 2005, SÉRÉ *et al.*, 2010; TISDALL e OADES, 1982). A compactação, especialmente em áreas urbanas, geralmente, gera feições maciças e/ou de baixa agregação (SÉRÉ *et al.*, 2010), com ocorrência de altos valores de densidade do solo (SCHUELER, 2000). Com isso, a ausência ou a pequena intensidade do processo de Pedalização nessas áreas e, conseqüentemente na formação e/ou desenvolvimento de agregados, tende a promover a diminuição da infiltração e permeabilidade de água, o que aumenta o escoamento superficial, potencializando o risco a enchentes (ALAOUI *et al.*, 2018).

Os agregados são formados principalmente por floculação, processo que depende da presença de minerais da fração argila, matéria orgânica, agentes cimentantes e aglutinação mecânica por micélios de fungos micorrízicos (SIX *et al.*, 2000; OADES e WATERS, 1991; TISDALL e OADES, 1982). Macroscopicamente, os agregados formam arranjos “estruturais”, os quais podem coexistir em um perfil do solo como reflexo de diferentes materiais de origem e de distintas condições ambientais as quais o solo foi submetido ao longo de sua evolução (OADES e WATERS, 1991). As estruturas são classificadas conforme sua tridimensionalidade em granulares, blocos (angulares e subangulares), prismáticas (prismáticas ou colunares) ou laminares, além de maciça quando o material é coeso e grãos soltos no caso de constituintes sem coesão (CAPECHE, 2008).

A estrutura granular é caracterizada por três dimensões similares e ocorre associada à presença de matéria orgânica e/ou óxidos de ferro e alumínio que promovem a aglutinação por floculação e cimentação. Apesar de as estruturas em blocos, assim como as granulares, possuírem dimensões análogas e serem influenciadas pela presença de óxidos de ferro e alumínio, sua gênese, principalmente em áreas tropicais, está muito relacionada à existência de intenso regime de umedecimento e secagem na região (OADES e WATERS, 1991). Além

disso, sofre grande influência da abundante presença de argilomineral do tipo 1:1, como a caulinita, que apresenta predominantemente carga negativa nas condições dos solos tropicais, ligando-se aos óxidos (SIX *et al.*, 2002).

Já a estrutura prismática, apesar de ter sua formação influenciada pelos ciclos de expansão e contração, assim como as estruturas em blocos, normalmente é associada à presença de argila de alta atividade, argilominerais 2:1. Feições laminares possuem dimensão vertical menor do que a horizontal, indicando, possivelmente, que o material sofreu pressão do peso do próprio solo ou do manejo superficial (CAPECHE, 2008). A coalescência e o colapso de vesículas que contêm ar, típicos de ambientes ricos em sais e silte sob ciclos de umedecimento e secagem, também pode gerar a acomodação do solo em forma de estruturas laminares (TURK e GRAHAM, 2011)

Quando o solo é composto de agregados relativamente grandes e estáveis, independente dos tipos, há o favorecimento da formação da “porosidade estrutural”, que são macroporos. Quando conectados, os macroporos direcionam os fluxos gasosos e hídricos, ou seja, atuam sobre a condutividade hidráulica (TISDALL e OADES, 1982; JANGORZO *et al.*, 2013). O oposto ocorre nos solos enriquecidos em “poros texturais” ou microporos, onde o fluxo hídrico é lesado em favorecimento da retenção de água (TISDALL e OADES, 1982).

Apesar das grandes modificações que as cidades ocasionam nos solos, os processos pedogenéticos levam ao surgimento de novas estruturas pedogenéticas destruídas pelas ações antrópicas, devido, por exemplo, as ações de compactação e revolvimento (SÉRÉ *et al.*, 2010). Os processos pedogenéticos podem ter rápida atuação dentro de um perfil de solo modificado, propiciando melhora das condições físicas então desmanteladas. Para tanto, é preciso que algumas condições sejam atendidas, como a amenização das forças que promovem a compactação e um determinado aporte de matéria-orgânica (SÉRÉ *et al.*, 2010; HUOT *et al.*, 2015; LEGUÉDOIS *et al.*, 2016).

É compreendido que a ocorrência de processos pedogenéticos proporciona melhor organização dos constituintes dos solos modificados (HUOT *et al.*, 2015), entretanto, há pouco conhecimento sobre como a heterogeneidade dos constituintes, característica típica de solos modificados (WATTEAU *et al.*, 2018; ADDERLEY *et al.*, 2010) atua no desenvolvimento de agregados e o período de tempo necessário para a formação da estrutura, a ponto de contribuir para o aumento significativo da capacidade de infiltração e da condutividade hidráulica dos solos nas cidades.

## **2 – Objetivos e Hipóteses**

### **2.1 – Objetivo Geral:**

O objetivo geral da pesquisa foi demonstrar a atuação de processos pedogenéticos relacionados ao desenvolvimento de estrutura e sua influência na condutividade hidráulica em solos modificados em ambientes urbanos.

#### **2.1.1 – Objetivos Específicos:**

- i)** Estabelecer o tempo inicial ( $t_0$ ) do processo de formação de estrutura na área, a partir da compreensão do histórico do uso da terra.
- ii)** Compreender a organização macro e micromorfológica dos solos, por meio de análise qualitativa e quantitativa da estrutura e do sistema poroso.
- iii)** Compreender as características físicas e químicas dos solos que influenciam na formação das estruturas pedogenéticas.
- iv)** Compreender o papel de artefatos antrópicos nos processos pedogenéticos ocorrentes nos solos

### **2.2 – Hipóteses**

Considerando um solo alterado por ações relacionadas ao processo de urbanização, no qual tenham sido cessados os grandes processos de alterações antrópica, é possível: **i)** Haver desenvolvimento de estrutura na escala de décadas, com concomitante aumento de porosidade e diminuição da densidade aparente; **ii)** Haver heterogeneidade das características estruturais do solo como reflexo da heterogeneidade dos solos altamente influenciados pelas ações humanas e dos processos pedogenéticos;

### 3 – Revisão bibliográfica

#### 3.1 – Características de solos modificados pelo processo de urbanização

Os solos modificados em áreas urbanas expressam em suas características heterogêneas e complexas o próprio processo de urbanização (MOREL *et al.*, 2005). Desse modo, em resposta às interações entre ações antropogênicas e processos naturais, a evolução dos solos modificados e construídos é extremamente diversificada (BIDWELL e HOLE, 1965). Estudos sobre *Technosols*, solos sob ação antrópica (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022), têm demonstrado sua heterogeneidade quanto à morfologia (CRAUL, 1985), ao pH, densidade (ROKIA *et al.*, 2014), disponibilidade de nutrientes (MOLINEUX *et al.*, 2009) e ao movimento interno da água (SÉRÉ *et al.*, 2012). Tem sido apontado também que as modificações influenciadas por ações antrópicas afetam as características biológicas (DEEB *et al.*, 2016) e os serviços ecossistêmicos prestados pelos solos (MOREL *et al.*, 2015), bem como, sua própria evolução pedogenética (HUOT *et al.*, 2015; LEGUÉDOIS *et al.*, 2016; SÉRÉ *et al.*, 2010).

Nos perfis de solos modificados é comum a presença de seções onde a característica principal é a heterogeneidade devido à deposição. Em ambientes urbanos é possível encontrar horizontes e camadas dentro dos perfis de solos. Segundo Santos *et al.* (1983), são camadas dos solos, as seções formadas por materiais tanto mineral quanto orgânico que possuem propriedades que não resultam, ou pouco estão relacionadas à atuação de processos pedogenéticos. Por outro lado, ainda segundo o citado autor, são horizontes as seções formadas por materiais orgânicos ou minerais com propriedades resultantes da atuação de processos pedogenéticos.

Em sua diversidade morfológica, os solos modificados apresentam camadas com mudanças abruptas entre si como resultado da diversidade de materiais e processos de deposição que ocorrem ao longo de períodos distintos (CRAUL, 1985; LADEIRA, 2012). Zonas formadas por materiais antrópicos de diferentes natureza e tamanhos, como plásticos, vidros, papéis e borrachas são comuns dentro do solo de áreas urbanas, contudo, há situações nas quais esses materiais não estão presentes, mas, o solo pode ser desprovido de sua típica organização por ações como corte e revolvimento (CRAUL, 1985; MOREL *et al.*, 2015).

A condição urbana é responsável pelas mais profundas modificações dos aspectos químicos dos solos (HOLLIS, 1991) dentre outras razões, pelo caráter básico dos objetos antropogênicos depositados, como aqueles utilizados em construção civil, os quais condicionam mudanças no pH (CRAUL, 1985). Solo modificado em área urbana sofre a alteração da disponibilidade de cálcio, magnésio, alumínio, potássio e matéria orgânica

(POUYAT *et al.*, 2002) e é vulnerável à contaminação por metais potencialmente tóxicos (MOURA *et al.*, 2006) principalmente chumbo, arsênio, cromo, cádmio, cobre, mercúrio, níquel e zinco (NORRA e CHENG, 2017). Essas transformações afetam a dinâmica de floculação e dispersão e, conseqüentemente, a organização interna do solo, pois o arranjo das partículas é dependente da capacidade de retenção de íons pelos constituintes (STOOPS, 1980).

Assim como as influências humanas afetam aspectos químicos do solo, elas também alteram o solo fisicamente por ações mecânicas. O revolvimento e compactação, modificando os arranjos internos do solo, causando a desestruturação do material, interfere em sua dinâmica hídrica e gasosa (CRAUL, 1985; POUYAT, 1991). De modo geral, a preparação do terreno para construção por técnicas de compactação e nivelamento fazem dos solos modificados ambientes mais densos do que solos não antropizados (SCHUELER, 2000). Fisicamente, o solo é alterado pelos objetos antrópicos, os quais criam barreiras para os fluxos internos, fazendo com que sua textura seja apenas parcialmente herdada do material litológico original do local (YANG e ZHANG, 2015). Outra modificação muito expressiva do trabalho humano é a criação de camadas impermeáveis, devido a implementação de camadas asfálticas ou compactação. Em ambos os casos, o resultado é a restrição à drenagem e à aeração, modificando o regime térmico, o que significa principalmente o aumento da temperatura no solo (CRAUL, 1985).

As alterações de temperatura, bem como as alterações químicas, refletem na capacidade do solo suportar vida em nível macro e microbiológico (JOIMEL *et al.*, 2014; BEYER *et al.*, 1995). A composição e abundância da fauna em solo modificado são determinadas pela interação de fatores naturais e antrópicos, e variam de espécie para espécie. Assim, os primeiros estudos da fauna em solo alterado focaram na tolerância das espécies à poluição, particularmente à contaminação por metais potencialmente tóxicos e os resultados indicaram uma relação complexa entre níveis de contaminação e o comportamento dos organismos (POUYAT *et al.*, 2010).

As respostas dos invertebrados a níveis elevados de metais ou outros poluentes variaram em termos taxonômicos do grupo, e de respostas individuais, de acordo com a idade, maturidade, dieta e diferenças genéticas, mas fato é que, a bioacumulação de metais ou outros poluentes na fauna de solos afetam organismos superiores na cadeia alimentar, como pássaros, lagartos e mamíferos que se alimentam de minhocas, por exemplo (POUYAT *et al.*, 2010).

Em solos modificados pela urbanização, alterações de pH que os tornem mais ácidos, colocam em risco a diversidade de populações que dependem diretamente do solo como habitat, incluindo artrópodes, vertebrados, nematóides, ácaros, insetos, fungos e bactérias (YAN *et al.*,

2016). Por reflexo da diminuição da biodiversidade nos solos modificados há a diminuição em 25% a 50% da atividade biológica responsável pela decomposição em relação à solos naturais (CARREIRO *et al.*, 1999). Deste modo, o ciclo do carbono e nitrogênio são afetados (VASENEV, *et al.*, 2014) o que conseqüentemente afeta plantas dos mais diversos gêneros e espécies, pois alterações causadas na comunidade microbiana geram menor taxa de mineralização do nitrogênio (WHITE e MCDONNELL, 1988), enquanto há o aumento da nitrificação (ZHU e CARREIRO, 1999).

Imediatamente após a perturbação de um solo em ambiente urbano, a tendência é o aumento da relação entre carbono microbiano e carbono orgânico total ( $cm_{ic}/TOC$ ), mas com diminuição gradativa dessa taxa ao longo do tempo (INSAM e HASELWANDTER, 1989). O aumento inicial de  $cm_{ic}/TOC$  indica a rápida perda de matéria orgânica enquanto que a diminuição indica o acúmulo, assim, quanto maior esse índice, maior a presença de matéria orgânica no sistema e conseqüentemente maior o grau de desenvolvimento do solo (SCHARENBRUCH *et al.*, 2005).

Nas últimas décadas houve aumento na percepção de que o meio ambiente fornece serviços ecossistêmicos (SE), os quais são divididos em quatro grupos: os de provisão, os de regulação, os culturais e os de suporte (MEA, 2005). No caso do solo, o SE de provisão, significa sua capacidade de fornecer ao homem, direta ou indiretamente, alimentos, água, madeira, fibras e combustíveis. O SE de regulação diz respeito à regulação do ciclo da água e de gases, de enchentes e inundações, de erosão, de doenças e de poluição e contaminação. O SE cultural simboliza a função do solo no sentido estético, espiritual, educacional e de recreação. Já o SE de suporte expressa a função de ciclagem de nutrientes, suporte de produções culturais, suporte de habitat e da biodiversidade (MEA, 2005; ADHIKARI e HARTEMINK, 2016).

Tendo em mente as alterações morfológicas, químicas, físicas e biológicas é esperado que haja modificações nas funções e nos SE prestados por esses solos. Contudo, há poucos estudos relacionando SE com as propriedades do solo (ADHIKARI e HARTEMINK, 2016), as quais são expressas de acordo com Blum (2005) e Greinera *et al.* (2017) pelas funções do solo (**Tabela 1**).

No ambiente urbano, o solo apresenta alterações em sua capacidade de promover os SE de maneira efetiva (MOREL *et al.*, 2015), portanto uma análise consistente das propriedades, funções e SE do solo modificado promove eficiência na tomada de decisões em

vários campos da engenharia e das políticas públicas dentro das cidades, evidenciando o papel ecológico e socioeconômico do solo no ambiente urbano (VASENEV e KUZYAKOV, 2018).

**Tabela 1:** Relação entre serviços ecossistêmicos, funções e as propriedades dos solos

Serviços ecossistêmicos	Funções dos solos	Propriedades dos solos
Cultural, como local com valor patrimonial; Suporte do patrimônio geológico; e de manutenção do equilíbrio ecossistêmico.	Armazenamento geológico e de herança arqueológica.	Conteúdo de carbono orgânico. Silte, argila, areia e fragmentos grossos.
Provisão de alimentos, fibra e madeira; regulação do sequestro de carbono; contribuição para atos de tradições/culturais.	Produção de biomassa.	pH. Profundidade da litologia original. Densidade aparente.
Regulação da disponibilidade de água e nutrientes; Suporte para as funções ecossistêmicas por meio do ciclo da água e de nutrientes.	Estoque, filtro e transformação de nutrientes e água.	Capacidade de água disponível. Capacidade de trocas catiônicas. Condutividade elétrica. Porosidade.
Provisão de fármacos e bioquímicos; Regulação de polinização de culturas e controle de pragas e doenças.	Hospedagem de biodiversidade.	Condutividade hidráulica. Capacidade de infiltração. Biota.
Suporte para moradia humana.	Suporte para atividades humanas.	Estrutura e agregação. Temperatura.
Provisão de materiais orgânicos e minerais.	Fonte de matéria prima.	Mineralogia.
Regulação do CO <sub>2</sub> atmosférico; Suporte de nutrientes.	Estoque de carbono.	Compactação.

Adaptado de Adhikari e Hartemink (2016). Elaborado pela autora.

Os serviços ecossistêmicos dos SUTMAs - *Soils in Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas*, foram categorizados em três grandes grupos por Morel *et al.* (2015) de acordo com o potencial de fornecimento de SE em distintas situações de modificação (**Tabela 2**).

O solo em ambiente modificado é multifuncional e justamente por ser um mosaico de funções, toda a deliberação de projetos de engenharia e paisagísticos precisaria considerar suas especificidades antes da implantação de obras, pois essa medida serve como meio de maximizar o fornecimento de SE (MOREL *et al.*, 2015). Para tanto, é preciso reconhecer a importância do conhecimento sobre o comportamento do solo ao longo do tempo (SÉRÉ *et al.*, 2010) incluindo assim o seu monitoramento como ferramenta que auxilia na restauração de terras abandonadas, o que perfaz o conhecimento de sua evolução qualitativamente e quantitativamente (WATTEAU *et al.*, 2019).

A investigação sobre a evolução de solos modificados, tais quais os *Technosols* e os SUTMAs é uma atividade recente e, por isso, ainda não há um banco de dados consistente sobre as propriedades e a dinâmica desses solos (CAPRA *et al.*, 2015). Análises criteriosas sobre os fatores de formação dos solos indicam que em ambientes urbanos os fatores atuantes são semelhantes aos que ocorrem em solos não modificados, mas que eles ocorrem em



assembleias incomuns (HUOT *et al.*, 2015) e geralmente agem rapidamente (LEGUÉDOIS *et al.*, 2016; SÉRÉ *et al.*, 2010) levando à organização dos solos e ao desenvolvimento de estruturas, as quais podem ser analisadas matematicamente por modelos desenvolvidos para solos naturais, como os modelos referentes à transferência de água e reatividade química dos solos (LEGUÉDOIS *et al.*, 2016).

**Tabela 2:** Categoria dos SE promovidos pelos solos modificados

Serviços ecossistêmicos		Grupo dos SUTMAs			
		VS	VF	SUTMAs: despejo	SUTMAs: selados
Provisão	Alimentar	++	++	(+)	O
	Biomassa não alimentar	++	++(+)	++	O
	Reserva mineral	+	+	+++	O
	Abastecimento de água	O	+	O	+++
Regulação	Armazenamento de água	++	+++	++	+
	Escoamento e controle de inundação	+++	++(+)	+	+(+)
	Atenuação da poluição	++	+++	++	+++
	Clima global	+++	++	++	+
	Clima local	+++	++	+	O
	Biodiversidade	+++	+++	++	O
	Espécies invasoras	O	++	O	O
	Purificação do ar	+++	++	+	O
	Controle de ruído	++	+++	++	+
Cultural	Serviços culturais/turismo	+++	++	O	O
	Arquivo da história humana	+	+	+++	++
	Paisagem	++	+++	+	+
	Educação	+++	+++	+++	+

Adaptado de Morel *et al.*, (2015), onde: VS=vegetação secundária (propositalmente inserida no ambiente); SE=serviços ecossistêmicos; VF=vegetação formada (formada sem a influência direta do homem); “+”= SE de baixo valor; “++”= SE de médio valor; “+++”= SE de alto valor. Elaborado pela autora.

Apesar de não ser possível, até o momento, estatisticamente destacar as características de maiores pesos no processo evolutivo dos *Technosols* é possível fazer postulações gerais sobre a importância de determinadas variáveis sobre a pedogênese a partir da revisão dos fatores de formação do solo e das características básicas dos processos pedogênicos (LEGUÉDOIS *et al.*, 2016). Além do clima e da topografia local, a evolução do solo depende da disponibilidade de matéria orgânica (SÉRÉ, 2010) e experimentos em solos construídos têm mostraram ganho de espessura do solo quando as condições climáticas favorecerem a atividade biológica (JANGORZO *et al.*, 2013; SCALENGHE e FERRARIS, 2009).

O acompanhamento da evolução pedogenética de solos alterados aponta que nos primeiros anos após grandes eventos de modificações há progressivo aumento no grau de estruturação, principalmente em locais de área verde (MUSIELOK *et al.*, 2018) ocasionando o aumento da conectividade dos poros em nível de microporos, e corroborando para a retenção de água (JANGORZO *et al.*, 2013; JANGORZO *et al.*, 2014). Ao longo do tempo a tendência

é que haja o progressivo aumento do fluxo hídrico (TIFAFI *et al.*, 2017) e a diminuição da densidade aparente, provocando a redução de seu peso (SCALENGHE e FERRARIS, 2009).

### 3.2 – Formação e estabilidade da macro e micro-organização do solo

Os processos pedogenéticos proporcionam a organização dos constituintes dos solos por meio da interação das frações grossas configurando diferentes níveis de organizações pedológicas (CHAUVEL, 1979) que variam da escala megascópica à nanoscópica (**Tabela 3**).

**Tabela 3:** Níveis de organização pedológica

Nível de organização	Paisagem	Sistema pedológico	Sucessão vertical de horizontes	Horizonte	Agregado elementar	Constituintes do agregado elementar
Escala intrínseca do nível	Megascópica	Macros cópica			Microscópica	Nanoscópica
Ordem de grandeza	Km-hm	hm-dam	dam-m	m-cm	cm-mm	mm-nm
Unidade de organização	Sistema pedológico em contínuum	Sucessão vertical de horizonte	Horizonte de solo	Agregado elementar	Constituição do agregado elementar	Compostos químicos
Técnica de observação	Direta a olho nu			Olho nu ou lupa	Microscópio ótico	Microscópio eletrônico

Km: quilômetro; hm: hectômetro; dam: decâmetro; m: metro; cm: centímetro; mm: milímetro; nm: nanômetro. Adaptado de Castro *et al.* (2008). Elaborado pela autora.

Em nível microscópico, o solo é organizado em microagregados, os quais são componentes elementares para a organização do solo em escalas menores (STOOPS, 2003). Esse primeiro nível na hierarquia evolutiva das organizações do solo depende da atuação de agentes cimentantes, dentre os quais está a matéria orgânica, os argilominerais e os óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de ferro e alumínio (HILLEL *et al.*, 1980). Diversas abstrações foram utilizadas para explicar a formação dos microagregados, sendo as de maior destaque a concepção de entropia estrutural de Dexter (1977), a teoria de nível hierárquico primário, secundário e terciário de organização do solo desenvolvido por Christensen (2001) e a teoria de formação de microagregados em nível hierárquico de Tisdall e Oades (1982).

Do ponto de vista físico e químico, o conceito de entropia expressa o grau de desorganização de um sistema. Unindo o conhecimento de entropia com características próprias do solo, Dexter (1977) propôs o estudo descritivo das organizações do solo a partir da sua disposição espacial em relação aos poros e em relação às frações finas e grossas. Desse modo, seria possível, segundo o autor, a identificação do grau de entropia, o qual aumentaria à medida que cresce o tamanho dos agregados. Dexter sugere ainda a existência de intra-agregados nos

solos, identificados apenas em escala de análise de extremo detalhe, o que evidenciaria a existência de evolução estrutural de um solo.

A existência de graus evolutivos na formação de agregados e micro-agregados também está em Christensen (2001), segundo o qual, pela associação entre organo-minerais antes dispersos na fração solúvel no solo, há o estabelecimento do primeiro nível evolutivo do solo, e a partir desse, por aglutinação, o segundo nível que, por sua vez, forma estrutura maior, essa visível em campo e que caracteriza o terceiro grau de complexidade do solo.

Dentre as diversas teorias para explicar a formação dos agregados a partir de hierarquias de agregação, a primeira entre elas a ganhar força destacava a importância da argila na agregação dos constituintes como resultado de natural orientação espacial, a partir da qual, seriam formados domínios que caracterizariam os próprios agregados (EMERSON, 1959). Menos de uma década após esse trabalho, Edwards e Bremner (1967) propuseram a teoria da formação de microagregados pela interação entre partículas de argila e de matéria orgânica, componente excluído do trabalho de Emerson.

Contudo, foram Tisdall e Oades (1982) os responsáveis pela principal teoria de formação e estabilização de agregados considerando níveis hierárquicos. Segundo eles, pela aglutinação de microagregados de argilas e matéria orgânica há a formação de macroagregados. Assim, além de contribuírem na explicação dos microagregados, sua teoria também tem importância ao destacar o papel das argilas em nível macroscópico (TOSCHE *et al.*, 2018).

A formação e a estabilização dos micros e macroagregados do solo dependem do fenômeno de sorção, o qual varia segundo a temperatura, pressão e a área superficial específica (ASE) dos constituintes. Matéria orgânica (MO) e argilominerais, por apresentarem grande ASE e cargas superficiais, são componentes com elevada capacidade sortiva (SIX *et al.*, 2000). No caso da matéria orgânica, além de possuir elevada capacidade sortiva decorrente da ASE, ela apresenta complexidade de composição e degradação, assim, atua por diferentes caminhos na organização do solo (TISDALL e OADES, 1982). A princípio, o material orgânico é atacado pela mesofauna do solo, como oligoquetas e formigas, para que então microorganismos passem a agir levando a rápida perda dos compostos menos recalcitrantes, ou seja, açúcares, proteínas, amidos, celulose e aminoácidos.

Após essa fase, os produtos orgânicos ainda presentes são biodegradados por microrganismos responsáveis pela produção de novo tipo de biomassa e há liberação de gás carbônico até que seja iniciado o estágio final do processo, o qual é caracterizado pela

decomposição gradual por actinomicetos e fungos dos produtos restantes, os quais formam as partes mais resistentes da MO (STEVENSON, 1994).

Essa diversidade de características da MO resulta em diferenças no modo de aglutinação e estabilização dos compostos do solo. Os agentes orgânicos são divididos em três grupos a partir de sua resistência à ação microbiana: os transicionais, os temporários e os persistentes (BASTOS *et al.*, 2005). No grupo dos agentes transicionais, as substâncias não húmicas, como os polissacarídeos, são os principais representantes devido a sua rápida decomposição pelos microrganismos (ANGERS e MEHUYS, 1989). Assim, são eles os responsáveis pela estabilidade inicial dos microagregados do solo. Já os agentes temporários, são as hifas de fungos e as raízes, constituintes que permanecem no solo por mais tempo e são capazes de estabilizar os constituintes até a escala de macroagregados.

No caso das raízes, elas exercem papel importante na agregação do solo por ação mecânica, uma vez que causam pressão nos constituintes do solo e liberam secreções de efeito aglutinante (TISDALL e OADES, 1982). Por fim, os agentes persistentes, os quais são constituídos por materiais orgânicos humificados, principalmente associados aos óxidos de Fe e Al de baixa cristalinidade, constituem a parte mais importante na formação de microagregados do solo (TISDALL e OADES, 1982; SIX *et al.*, 2000).

Argilominerais e óxidos também são importantes agentes de agregação (SIX *et al.*, 2000), principalmente no meio tropical, onde as condições ambientais aceleram a degradação da MO, de modo que a formação de complexos organo-minerais é fundamental para a criação e estabilização de agregados. Os argilominerais contribuem de distintos modos na criação e estabilidade de agregados por possuírem diferenças entre si em relação à estrutura cristalina, ASE e cargas superficiais (FERNÁNDEZ-UGALDE *et al.*, 2013).

Ressalta-se que em solos ácidos, como os caulíníticos, os óxidos de Fe são carregados positivamente em pHs abaixo dos pontos de carga zero (PCZ), enquanto a caulinita tende a estar carregada negativamente acima do seu ponto de carga zero, possibilitando a ligação química entre eles. Do mais, óxidos de ferro e de alumínio contribuem na estabilidade de microagregados por terem grupos – OH que são altamente reativos com matéria orgânica (DICK e SCHWERTMANN, 1996). Porém, o tipo de óxido de ferro, que varia de acordo com sua cristalinidade, também influencia na agregação desse solo (INDA JUNIOR *et al.*, 2007). Óxidos de ferro de baixa cristalinidade apresentam maior área superficial e, portanto, maior possibilidade de interação com os demais componentes do solo, ao passo que óxidos de maior cristalinidade são menos reativos (DUIKER *et al.*, 2003).

Associada ao material de origem, a variação do conteúdo de água ao longo do tempo, afeta o processo evolutivo de estruturação e formação do sistema poroso. Em solos sob condições controladas, Viana *et al.* (2004) demonstraram que após eventos de saturação, a tendência é a acomodação das partículas, concomitante à mudança na quantidade de poros. Ainda segundo os autores citados, a entrada de umidade no material pode levar à formação de filmes d'água entre os agregados, de modo que quanto mais agregados de pequenas dimensões, maior será a área superficial total ocupada pelos filmes d'água que podem, por diferença de cargas entre si e a fração sólida do solo, gerar agregação.

A variabilidade do conteúdo de água não é o único parâmetro que afeta a evolução do solo, de modo que além da umidade em si é preciso considerar a velocidade de entrada da água no solo. Assim, apesar de normalmente associado a solos com baixa presença de fendilhamentos, materiais ricos em argilominerais do tipo cauliníticos podem conter fraturas favorecendo rápida infiltração, situação que também permite a formação de bolhas de ar que geram pressão interna no solo (LIBARDI, 2005). De modo geral, a presença de ciclos de umedecimento e secagem permite que durante os períodos de baixa quantidade de água, fendas sejam abertas, pelas quais é possível a entrada de material alóctone ao horizonte (HUOT *et al.*, 2013).

Nesse sentido, Huot *et al.* (2013), analisando um solo construído pela atividade humana, concluíram que a existência de diferentes momentos de deposições permitiram a formação das fendas durante eventos de baixa disponibilidade hídrica. Novas deposições, seguidas de eventos de precipitação levaram a dissolução do material sobreposto e a neoformação de calcita e manganês nas fendas das camadas inferiores. As ações humanas, antes de dar origem aos solos, dão origem à novos materiais parentais. Nesse sentido, Huot *et al.* (2013) fizeram inferência da ocorrência de alterações mineralógicas em materiais originados de um forno siderúrgico para produção de liga de ferro. Para os autores, o material particulado, resultado da queima, ao ser resfriado e depositado em tanques de decantação pode sofrer transformações mineralógicas.

A classificação da micro-organização do solo depende da distinção entre unidades vizinhas, as quais são resultados das superfícies de menor resistência, ou seja, os limites gerados pela presença de poros ou por feições pedológicas (CASTRO, 2008). O arranjo geométrico forma quatro grupos morfológicos de microagregados definidos como esferoidal (grumosa ou granular); em bloco (angular ou subangular); laminar (ondulada, lenticular); e prismático (colunar ou em prisma) (BULLOCK *et al.*, 1985; SOIL SURVEY STAFF, 1993).

Os microagregados desenvolvem diferentes graus de pedalidade, significando que quanto mais desenvolvido um microagregado, mais destacado ele aparece em relação aos componentes que o cerca. Desse modo, o grau de pedalidade de um microagregado pode ser fortemente, moderadamente ou fracamente desenvolvido (BULLOCK *et al.*, 1985). Além do tipo e do grau de desenvolvimento, os microagregados apresentam grau de acomodação, o qual é entendido como o modo que as paredes dos agregados ajustam umas em relação às outras (BULLOCK *et al.*, 1985).

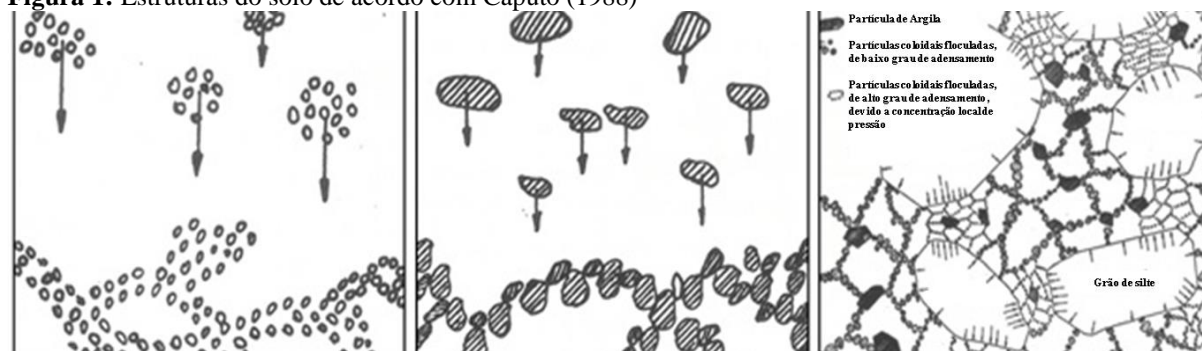
A gênese dos microagregados, além da dependência dos agentes cimentantes e da natureza dos constituintes, está associada à ocorrência de oscilação de períodos de umedecimento e secagem; de congelamento e descongelamento; à movimentação dos constituintes do solo por atuação da pedofauna e raízes, ocasionando aproximação ou afastamento dos materiais; a presença de secreções de microorganismos; e a subsolagem do terreno (BULLOCK *et al.*, 1985). Esses fatores condicionam os fluxos internos, sendo eles próprios, resultado desses fluxos, uma vez que a eluviação de material fino, como argila e matéria orgânica pode revestir os microagregados e poros internos, levando ao entupimento dos poros e à alterações dos fluxos.

Os microagregados e as microestruturas formadas a partir da associação entre microagregados, visíveis em microscópio óptico, foram morfologicamente classificadas em Bullock *et al.* (1985) em grãos interligados; grãos soltos; grãos com películas; grãos compactos; microestruturas com microagregados entre grãos; microestruturas com vesícula entre grãos; microestruturas com canais entre grãos; microestruturas com cavidades; tipo esponja; canais; câmaras; vesícula; grumosa; granular; blocos subangulares; blocos angulares; laminar; Prismática; microestruturas com fissuras; microestruturas com rachaduras; maciça; ou do tipo complexa.

A tendência das micro-organizações do solo é sua evolução para organizações macroscópicas, mais especificamente em agregados e estruturas (BRADY e WEIL, 2012). Os agregados são componentes de gênese complexa, uma vez que dependem da formação e estabilização das organizações estruturais inferiores e são de grande importância na aeração, no crescimento das plantas e na manutenção da endopedofauna, incluindo a população microbiana. Além disso, eles afetam a infiltração e o armazenamento de água (OADES, 1984; DEXTER, 1988; BASTOS *et al.*, 2005). A classificação dos agregados ocorre de acordo com o tamanho em um dos cinco grupos: < 2 µm; de 2 a 20 µm; de 20 a 250 µm, de 250 µm a 2 mm; e > 2 mm (BASTOS *et al.*, 2005).

Os agregados, pela literatura, são organizados em estruturas, as quais foram ainda na primeira metade do século XX, alvos de estudos classificatórios por Nikiforoff (1941) a partir da morfologia em planares, prismáticas, em blocos e granulares. Já Caputo (1988) segue uma classificação com nomenclatura distantes das de Nikiforoff, segundo a qual existe a estrutura granular simples, quando grãos individuais de areia ou pedregulho estão agrupados com grau de compactação densa ou solta; alveolar ou em favos de abelhas, quando decorre da interação de grãos soltos sobre sedimentos consolidados, deixando os grãos na exata posição em que houve o contato inicial com esse sedimento; estrutura fluculenta, a qual é formada em solos com predomínio de frações pequenas e sedimentadas capazes de gerar feições em arcos, levando a formação de outro arco; estrutura em esqueleto, formada quando parciais interstícios dos arranjos formados por grãos grossos são preenchidos por material mais finos (**Figura 1**).










**Figura 1:** Estruturas do solo de acordo com Caputo (1988)



Da esquerda para a direita é possível ver o processo de formação de estruturas no solo a partir da integração de grãos soltos por meio da coesão pelo preenchimento com material fino. Adaptado de Caputo (1988). Elaborado pela autora.

Partindo da classificação de Nikiforoff, o *Soil Survey Manual* da *Soil Science Division Staff* (DITZLER *et al.*, 2017) classifica as estruturas dos solos como granular, em blocos (angulares e subangulares), planares, prismáticas, colunares, em cunhas, e em lenticulares, apresentando ainda a terminologia maciça e em grãos soltos para os solos desprovidos de arranjos estruturais. A descrição da estrutura do solo é a descrição do arranjo tridimensional das partículas e vazios que compõem o solo (LETEY, 1991). É preciso lembrar que as paredes das estruturas possuem rugosidade que variam em função de fatores intrínsecos, como textura e distribuição dos agregados, e fatores extrínsecos, como o uso da terra e topografia (HIRMAS *et al.*, 2016). Baseado no *Soil Survey Manual*, o Manual de Descrição de Coleta de Solos (SANTOS *et al.*, 2015), amplamente utilizado no Brasil, apresenta 4 tipos de estruturas (**Tabela 4**).

**Tabela 4:** Tipologias de estruturas do solo

<b>Feições formadas pela presença de estruturas</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Característica principal</b>	<b>Subtipo</b>	<b>Aspecto</b>	<b>Característica específica</b>
Granular	Formas arredondadas	Granular		Arranjo pouco poroso
		Grumosa		Arranjo muito poroso
Blocos	Dimensões horizontais e verticais aproximadamente iguais	Angular		Ângulos proeminentes
		Subangular		Ângulos não proeminentes
Laminar	Dimensão vertical menor do que a horizontal	-		-
Prismática	Uma das extremidades é maior do que a outra	Colunar		Extremidades superiores são aproximadamente arredondadas
		Prismática		Extremidades superiores são aproximadamente planas
<b>Feições formadas por ausência de estruturas</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Aspecto</b>	<b>Característica principal</b>		
Maciça		Ausência das estruturas definidas anteriormente		
Grãos soltos		Predominância de grãos soltos		

Adaptado de Santos *et al.* (2015). Ilustração de Daniel Ramos Pontoni (IBGE, 2015). Elaborado pela autora.

As estruturas são descritas ainda conforme seu tamanho, variando em: muito pequena, pequena, média, grande ou muito grande, porém as dimensões que limitam essas classes são variáveis de acordo com cada tipo de estrutura e possuem diferentes graus de desenvolvimento, expressando a coesão interna e externa dos agregados (SANTOS *et al.*, 2015). Ainda de acordo com os autores citados, no caso das feições com ausência de estruturas, o grau de desenvolvimento é do tipo não coerente para grãos soltos e coerentes para feições maciças. Nas feições estruturais, o grau de desenvolvimento pode ser: fraca (se as unidades estruturais formadas pelos agregados são pouco presentes); moderada (se as unidades estruturais formadas pelos agregados são bem presentes e, portanto, pouco material solto); forte (se as unidades estruturais formadas pelos agregados são presentes e não podem ser separadas facilmente uma das outras).

Caracterizar quantitativamente as estruturas do solo tem sido um enorme desafio, que atualmente tem como aliada a análise de imagens. A compreensão da organização tridimensional do solo tem avançado nos últimos anos, permitindo a obtenção de parâmetros morfométricos da arquitetura do solo (ECK *et al.*, 2013; HARTEMINK e MINASNY, 2014; HIRMAS *et al.*, 2016; ECK *et al.*, 2016). A caracterização da morfometria dos agregados e estruturas do solo auxiliam na compreensão de sua gênese e evolução (SCHAETZL e ANDERSON, 2005). A classificação dos agregados como granulares, por exemplo, são indício



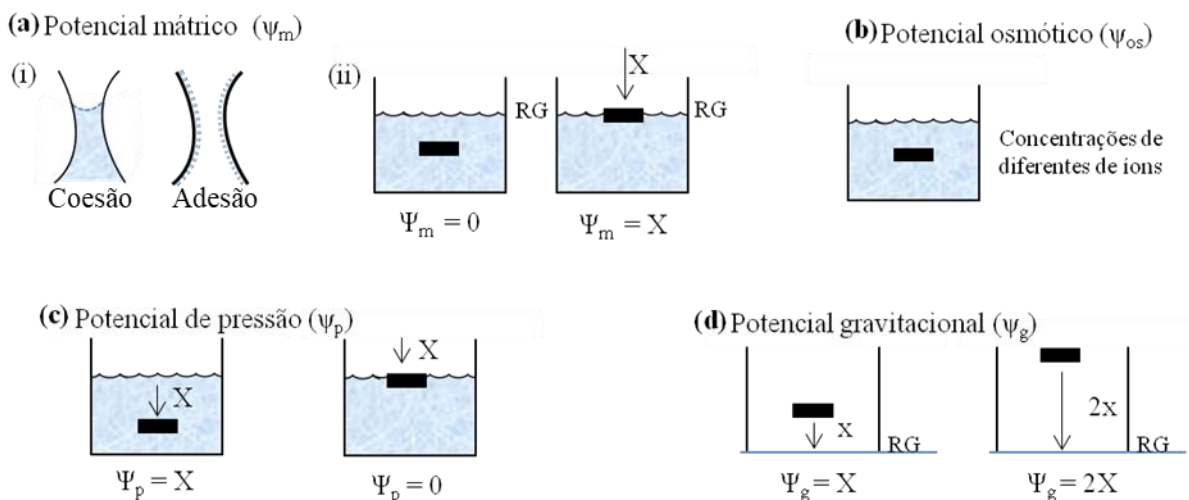
de bioturbação (MIRKOS, 1992) e a proeminência de ângulos nas estruturas fornece informações quanto à idade relativa do material, pois estruturas com vértices angulosos são frequentes em solos mais jovens, pois é presumível a necessidade do efeito do tempo no desgaste dos ângulos (DEXTER, 1985).

### 3.3 – Escoamento em meio poroso e condutividade hidráulica no solo

O solo, de modo simplificado, pode ser compreendido como um corpo composto por 50% de sólidos, 25% de água, e 25% de ar e, portanto, de característica porosa (LIBARDI, 2005). Na interação dessas partes, diversos potenciais físicos ocorrem e são responsáveis pela organização interna do solo e por suas propriedades físicas, dentre elas o movimento de fluidos, ao qual é atribuído o nome de condutividade hidráulica. A nomenclatura condutividade hidráulica evidencia uma generalização sobre a composição desse fluido, pois, caso fossem consideradas as substâncias solúveis presentes, o correto seria a utilização do termo condutividade de fluido newtoniano e não de um termo que reflete a presença de água em estado puro (LIBARDI, 2005).

Os potenciais atuantes no solo são dependentes do tamanho do poro, do conteúdo de água e da concentração de íons dissolvidos (**Figura 2**) e são categorizados em potencial mátrico ( $\psi_m$ ), osmótico ( $\psi_{os}$ ), de pressão ( $\psi_p$ ), gravitacional ( $\psi_g$ ), e térmico ( $\psi_t$ ) e ainda, a soma desses, o potencial total ( $\psi_{tt}$ ).

**Figura 2:** Potenciais presentes no solo



A imagem ilustra a atuação dos potenciais em relação ao solo.  $\psi_m$ : potencial mátrico;  $\psi_{os}$  potencial osmótico;  $\psi_p$ : potencial de pressão;  $\psi_g$ : gravitacional;  $\psi_t$ : potencial térmico;  $\psi_{tt}$ : potencial total. Elaborado pela autora.

O potencial mátrico (**Figura 2a**) ocorre devido à presença da matriz do solo, ou seja, depende da interação sólido-gasoso e sólido-líquido que resultam nas chamadas forças mátricas, incluindo as forças capilares e de adesão. Enquanto a força de adesão é referente à retenção de água na superfície das partículas, a força capilar, responsável pelo movimento ascendente da água, depende da interação entre a superfície sólida do solo e do líquido (a própria força de adesão), mas também da tensão superficial da água causada pela coesão. Em termo qualitativo, o solo em estado próximo à saturação, apresenta domínio da força capilar e na medida em que o conteúdo de água diminui, a adesão ganha importância. Contudo, ao saturar ambas deixam de existir (LIBARDI, 2005).

Uma vez compreendido o papel da água no potencial matricial fica evidente que a ação das forças mátricas reduz a energia potencial total da água livre e que o potencial mátrico será menor quanto menor for a umidade do solo, mas ele é inexistente no caso de solo saturado do mesmo modo que a adesão é nula. De acordo com Libardi (2005) em solos úmidos, o potencial mátrico é determinado principalmente pela força capilar, enquanto que em solos com baixo teor de umidade o potencial mátrico é determinado principalmente pela adesão.

Outro fator que influencia na concentração de água no solo é a relação entre a concentração de íons e o volume de água no solo, sendo que a essa relação é atribuído o nome de potencial osmótico (**Figura 2b**). Os estudos de base físico/matemático sobre o comportamento hídrico no solo dependem de simplificações da realidade, assim, a água, é considerada em estado puro, situação que não condiz com realidade, pois ela interage com diferentes gases presentes na atmosfera, rochas e outros materiais na litosfera, bem como com várias substâncias sólidas da matriz do solo e com os gases presentes em sua atmosfera (LIBARDI, 2005). Desse modo,  $\psi_{os}$  normalmente é desprezado, mas é fundamental ter em mente que quanto mais concentrada a solução menor sua energia, portanto menor é  $\psi_{os}$ .

No solo, a resultante do peso gerado pela coluna de água é recebe o nome de potencial de pressão (**Figura 2c**) a qual é equivalente à pressão hidrostática no solo. Se, por um lado,  $\psi_p$  varia de acordo com a água dentro do solo, o potencial gravitacional (**Figura 2d**) ocorre independente da concentração de água. Todos os corpos dentro de um campo gravitacional apresentam  $\psi_g$  que varia apenas em função da altura do corpo em relação ao referencial gravitacional (RG). Apesar de reconhecida a existência de um quinto potencial atuante no solo, o potencial térmico, esse é normalmente desprezível nos estudos sobre água no solo devido a sua baixa variabilidade e sua difícil determinação (LIBARDI, 2005).

A partir do exposto, fica evidente que diferentes tamanhos de poros existentes nos solos, em função do arranjo das partículas sólidas, corroboram para a atuação de determinados potenciais. Assim, por exemplo, quanto maior a prevalência de macroporos, maior será a atuação do potencial gravitacional, ao passo que o potencial mátrico está associado a poros menores (**Tabela 5**).

Considerando os dois momentos extremos da presença de água no solo, este é considerado como não saturado se parte de seus poros está preenchida com ar e parte com água, enquanto que quando todos os poros estão preenchidos com água, o solo está em condição saturada. Quando inexistente pressão gerada pelo ar nos poros, ou seja, em condição de saturação, a velocidade do fluxo ocasiona a condutividade hidráulica máxima (HILLEL, 1971). Nessa condição, o fluxo dentro da matriz do solo é constante, diferente no caso de solo não saturado, onde o fluxo varia em conformidade com as mudanças do  $\psi_m$ . Assim é possível dizer que em solos saturados, o conteúdo de água dentro de um intervalo de tempo é constante e depende apenas da distribuição dos sólidos.

**Tabela 5:** Relação entre tamanho dos poros e fluxo hídrico

<b>Tamanho dos poros</b>	<b>Propriedades atuantes no movimento da água</b>	<b>Potenciais predominante</b>
10 mm a 1 mm	(a) Fissuras, túneis e espaços entre aglomerados. (b) Transmite água livremente se o solo está saturado.	Gravitacional
<1 mm a 30 $\mu\text{m}$	(a) Poros entre agregados e microagregados. (b) Transmite água durante a infiltração e são drenados na capacidade de campo ( $\psi_m=10\text{KPa}$ ).	Gravitacional e Mátrico
< 30 $\mu\text{m}$ a 200 nm	(a) Poros intra agregados. (b) A água retida nos poros ainda é acessível às plantas, sob a condição de $\psi_m = -1,5 \text{ KPa}$ .	Gravitacional e Mátrico
< 200 nm a 1 nm	(a) Poros da fração argila, onde as famosas alterações devido a expansão e contração ocorrem. (b) O tamanho do poro muda de acordo com o conteúdo de água pela reatividade da argila alterando, ainda, a densidade do solo.	Mátrico

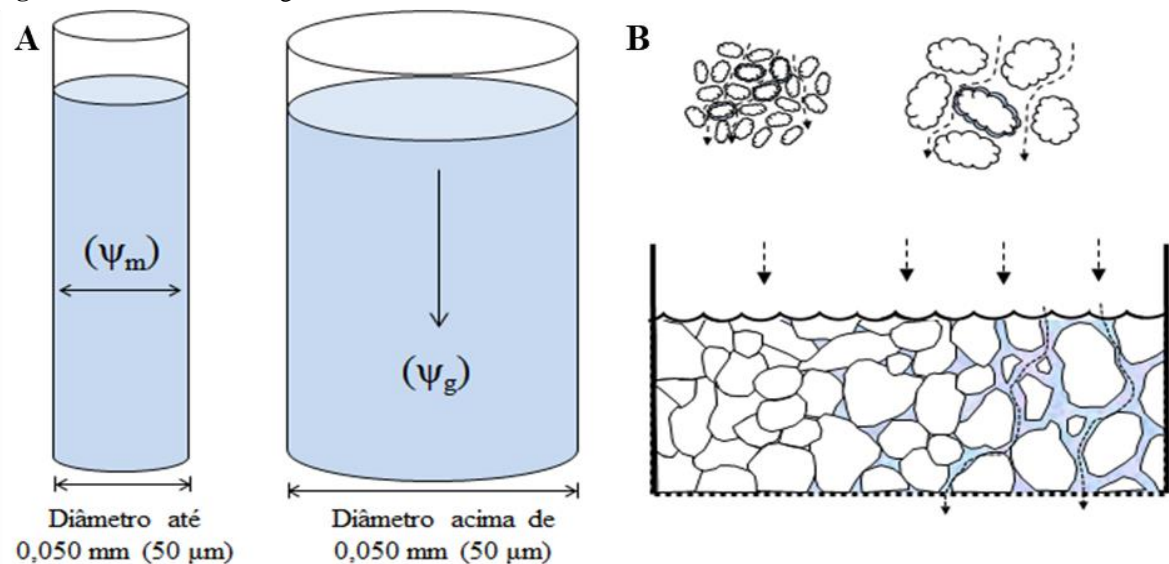
Elaborado pela autora.

Por outro lado, a presença de vazios da condição não saturada gera a atuação da força capilar e a formação de meniscos que atuam como uma força contrária ao movimento da água, originando pressão negativa, chamada de sucção. O decréscimo do conteúdo de água, ocorre inicialmente nos macroporos pela perda de água em estado livre devido à ação do  $\psi_g$ . Uma vez que a força matricial volta a atuar na retenção de água e parte da água pode ficar confinada nos poros menores, ocorre a diminuição da condutividade (**Figura 3**).

A distribuição dos tamanhos das partículas dos solos bem como as formas de seus poros e canais afeta a condutividade hidráulica (LIBARDI, 2005). Contudo, apenas esses parâmetros não bastam para representar o comportamento hídrico nos solos, sendo fundamental

o conhecimento sobre a conectividade dos poros, condição expressa pela conectividade entre os canais (CINTRA, 1997). Na condição saturada, a condutividade depende mais da estrutura do solo do que da textura desse solo, ou do tamanho e da conectividade de seus poros (GONÇALVES e LIBARDI, 2013). Porém, existe ainda a percepção de que os maiores valores de  $K_0$  são associados aos maiores valores de porosidade, principalmente macroporos gerados pela presença do predomínio da fração areia grossa (BOUMA, 1982). Contudo, solos de textura fina e ricos em microporos podem apresentar considerável condutividade hidráulica se seus poros forem contínuos, enquanto que macroporos em uma dada seção de pouca conectividade, não contribuem efetivamente para o fluxo hídrico (LIBARDI, 2005).

**Figura 3:** Movimento da água no solo



A imagem A ilustra a relação existente entre a dimensão do poro e o potencial predominante, assim, quanto maior o poro maior será a atuação do potencial gravitacional. A imagem B complementa a imagem A mostrando a dificuldade da água em transpassar por um sistema poroso estreito. Elaborado pela autora.

A demonstração do comportamento da água por parâmetros quantitativos ganhou força no meio científico após Henry Darcy em 1856 desenvolver em ambiente controlado um experimento utilizando uma coluna vertical de areia para duas demonstrações. A primeira demonstração foi realizada em 4 séries, onde em uma dessas séries a coluna de areia era compactada para testar distintas vazões a partir da parte superior da coluna. Na segunda demonstração, realizada com 35 ensaios, foi considerado sempre o mesmo grau de compactação, variando apenas a carga hidráulica, mas dessa vez a partir da base da coluna.

Darcy concluiu que a velocidade média de um fluido em meio poroso é diretamente proporcional ao gradiente de pressão disponível para o escoamento e é inversamente

proporcional ao comprimento do percurso (LIBARDI, 2005). De modo detalhado o experimento de Darcy permite as seguintes inferências:

- A. Em condição de equilíbrio dinâmico, ou seja, quando não há variação de vazão do fluido dentro de um determinado intervalo de tempo, essa vazão que transpassa a coluna por unidade de tempo é proporcional ( $\alpha$ ) à área da seção transversal dessa coluna. Portanto, é possível supor a existência de relação entre as variáveis;
- B. Que a vazão é diretamente proporcional à um delta entre as cargas piezométricas ( $h_1-h_2$ ) que atuam nas extremidades da coluna;
- C. Que a vazão é inversa ao comprimento da coluna de areia;

A partir das observações geradas pelo experimento de Darcy, a equação de Darcy para o movimento da água em meio poroso é dada (**Equação 01**) considerando que a vazão (Q) resulta da relação entre a condutividade hidráulica (K), a perda de carga ( $\Delta h$ ), o comprimento do material (L), e a área da seção transversal (A).

$$Q = K * \frac{\Delta h}{L} * A$$

**Equação 1**

Partindo da equação de Darcy, o Manual de Métodos de Análise de Solos de Teixeira *et al.* (2017) considera que a condutividade hidráulica (K) em  $\text{cm h}^{-1}$  pode ser obtida considerando o volume percolado (Q) em mL; altura do bloco de amostra (L) em cm; a altura do bloco de amostra e da lâmina d'água (H); a área do cilindro (A) em  $\text{cm}^2$ ; e o tempo do experimento para atingir a constância de percolação (t).

Contudo, em condições não controladas, ou seja, em ambiente natural, o solo dificilmente está saturado, como o material utilizado para elaboração da equação de Darcy. Deste modo, segundo Libardi (2005) a partir de uma extensão da equação de Darcy, Buckingham em 1907 quantificou o movimento de uma solução em meio não saturado, trabalho que posteriormente foi alterado por Corey e Kluter em 1985.

Foi Buckingham o responsável pela introdução da percepção da existência da força capilar no meio poroso, a qual condiciona a ascensão da água devido à presença do menisco. A partir dessa percepção foi definido o conceito de potencial mátrico ( $\psi_m$ ) atuante no solo não saturado, dentro do qual está o “potencial capilar” ou “condutividade capilar”, ambos explicados anteriormente. Porém, apesar do avanço, faltava a inclusão do papel da gravidade, ou seja, do  $\psi_g$ , o que limitou a explicação da condutividade hidráulica horizontal, ou seja, a difusividade da água no meio.

O trabalho de Buckingham é baseado nas equações de pedotransferência, as quais já haviam sido utilizadas para a determinação da capacidade de campo e do ponto de murcha a partir de atributos facilmente mensuráveis (LOFRANO, 2018). Foi a partir de Buckingham que Richards, em 1928, propôs uma explicação para o comportamento da água em meio poroso não saturado considerando o potencial total ( $\psi_{tt}=\psi_m+\psi_g$ ), o qual representa a soma do potencial capilar ( $\psi_m$ ) e gravitacional ( $\psi_g$ ).

Então, uma nova equação representativa do movimento da solução em meio não saturado foi criada (**Equação 02**) considerando que a densidade de fluxo de água ( $q$ ) varia de acordo com uma função da condutividade hidráulica ( $K(\theta)$ ) que depende do teor de umidade presente no solo, da variação de potencial ( $\Delta\psi_t$ ) que representa a soma do potencial mátrico e do potencial gravitacional, e do comprimento do solo ( $L$ ).

$$q = -K(\theta) * \frac{\Delta\psi_t}{L} \quad \text{Equação 2}$$

Apesar das contribuições de Richard, a equação foi batizada de “equação de Darcy-Buckingham”, já que houve enorme contribuição dos estudos de Darcy para sua formulação (LIBARDI, 2005). Assim, a condutividade hidráulica foi posta como um parâmetro que indica o movimento da água dentro do solo em um intervalo de tempo e que, por simplificação, varia de acordo com as características do solo e não do fluido.

Considerando que as características dos solos são controladas pela interação entre suas fases líquidas, sólidas e gasosas é presumível que a condutividade hidráulica tenha variações de acordo com as próprias propriedades do solo (KLUTER, 1965). Dentre as propriedades e atributos dos solos mais influentes sobre os valores de condutividade hidráulica, Fiorin (2008) definiu a densidade do solo, a densidade de partículas, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, o conteúdo de argila, silte, areia, o volume de água da condição de saturação e o volume de água à 1KPa como as de maior peso e poder de correlação.

Segundo Lofrano (2018), os caminhos de elaboração das equações de Darcy, de Darcy-Buckingham e a de Richards incluíram a adesão de diversos conceitos, dentre eles os princípios da equação da continuidade, o princípio da conservação da energia, a equação de energia e a equação de Bernoulli, a equação de Navier-Stokes, a equação de Chezy, a equação de Prony, a Lei de Hagen-Poiseuille, o Número de Reynolds ( $Re_D$ ), o Princípio de aderência de Stokes, o conceito de Camada Limite, a Harpa de Nikuradse, a equação de Rouse, e a equação de Moody.

Das inúmeras expressões de representação das propriedades hidráulicas do solo para satisfazer a equação de Richards, deve ser destacada a função de Van Genuchten de 1980 (**Equação 03**) para estimativa da curva de retenção de umidade. A curva de retenção de umidade, ou curva característica, reflete os fenômenos de retenção da água no solo, mais especificamente a adsorção e a capilaridade por meio da relação entre o potencial matricial da água no solo e o teor de água ao longo do tempo.

$$\theta = \frac{\theta_r + (\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha * h|^n)^m} \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $\theta$  corresponde à umidade volumétrica;  $\theta_s$ , à umidade do solo na saturação, ou seja, no potencial mátrico igual a zero;  $\theta_r$ , à umidade do solo em um potencial mátrico infinitamente negativo;  $\alpha$  ao inverso do valor de potencial mátrico em que ocorre a entrada de ar no maior poro do solo;  $h$  à altura de sucção de água;  $m$  e  $n$  correspondem à parâmetros físicos sem significado aparente, mas que são relativos à água no solo.

A determinação de  $\theta_s$  pode ser compreendida como a determinação da porosidade total do solo, uma vez que na condição de umidade máxima, todos os poros do solo estão preenchidos, assim seu valor é estabelecido a partir da determinação da densidade do solo e da densidade de partícula. Para a determinação de  $\theta_r$ , embora não seja consenso, o valor de -1500 kPa é habitualmente adotado, pois esse valor expressa o ponto de murcha permanente para a maioria das espécies.

Ocorre que na equação apresentada em 1980 as variáveis  $n$  e  $m$ , representando parâmetros relativos à água no solo, são dependentes entre si. Assim, o próprio Martinus Theodorus van Genuchten em colaboração com Donald Nielsen, avançou na equação 5 para que ela fosse capaz de oferecer tratamento independente para  $n$  e  $m$  na função de condutividade hidráulica (VAN GENUCHTEN e NIELSEN, 1985). Tal avanço ocorreu pela introdução dos modelos de Burdine e de Mualem, modelos que consideram a distribuição dos tamanhos dos poros como influentes no fluxo hídrico interno do solo e que refletem na inclinação da curva de retenção.

Quando utilizado o método de Burdine para a estimativa da condutividade hidráulica é assumido  $m=1-2/n$ , enquanto que pelo método de Mualem  $m=1-1/n$ . Dentre Burdine e Mualem, o emprego da equação de Mualem à equação de Van Genuchten é a forma mais convencional, possibilitando alcançar uma nova equação para a condutividade hidráulica em solo não saturado (**Equação 04**).

$$K(h) = K_s S^{\tau} [1 - (1 - S^{1/m})^m]^2 \quad \text{Equação 4}$$

Onde K(h) corresponde à condutividade hidráulica não saturada; K<sub>s</sub> à permeabilidade saturada; S a função de h existente na equação para determinação da umidade volumétrica relativa (U), ou seja,  $U = [1 / (1 + (\alpha|h|^n))]^m$ ; τ ao parâmetro de conectividade dos poros estimado por Mualem, o qual em termos numéricos pode ser considerado como 0,5.

A determinação da condutividade hidráulica não saturada em campo foi estudada por Zhang (1997) o qual concluiu que a determinação da infiltração é essencial, o que significa considerar a quantidade de água no instante 0, ou seja, o conteúdo de água inicial. Assim, o uso de infiltrômetro de disco é um dos métodos que permite a estimativa, em campo, da infiltração considerando a aplicação de diferentes sucções (**Equação 05**) permitindo alcançar a sorvidade (**Equação 06**) e a condutividade hidráulica não saturada (**Equação 07**) do solo.

$$I = C_1 t_1 + C_2 t \quad \text{Equação 5}$$

$$S(h_0) = \frac{C_1}{A_1} \quad \text{Equação 6}$$

$$K(h_0) = \frac{C_2}{A_2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde I corresponde a infiltração; C<sub>1</sub> ao volume infiltrado no instante 1; t<sub>1/2</sub> a raiz quadrada do tempo transcorrido; C<sub>2</sub> ao volume infiltrado no instante 2; t o tempo transcorrido; S(h<sub>0</sub>) a sorvidade do solo sob uma sucção definida; K(h<sub>0</sub>) a condutividade hidráulica sob uma determinada sucção; e A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> aos coeficientes adimensionais que expressam características do solo e são extraídos da equação de Van Genuchten (Equação 06).

### 3.4 – Microplásticos no solo

Atualmente é perceptível que devido à enorme produção e má gestão, os resíduos de plástico tornaram-se um desafio ambiental. A maioria dos plásticos comercializados pertencem às categorias de polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloreto de polivinila (PVC) e tereftalato de polietileno (PET) e estão presentes no dia a dia das pessoas (HE *et al.*, 2018; OKOFFO *et al.*, 2021). Os plásticos são de difícil degradação, mas passível de fragmentação ao longo do tempo. Microplásticos são partículas poliméricas menores que 5 mm encontradas nos mais variados ecossistemas terrestres. No solo, os microplásticos representam um perigo para a biota devido às suas características não naturais e persistentes no ambiente que são capazes de alterar o solo do ponto de vista químico e físico (MACHADO *et al.*, 2018).



A superfície dos microplásticos tende ser carregada negativamente em diferentes valores de pH (LUO *et al.*, 2020). Estudos têm demonstrado que goethita e magnetita são óxidos de ferro capazes de sorver microplásticos, sendo maior a capacidade de sorção da goethita, enquanto que caulinita e montmorilonita não adsorvem microplásticos tão bem (LUO *et al.*, 2020). Resíduos urbanos, como os depositados em aterros e lixões, são ricos em plásticos que sob a ação de intempéries e ações biológicas são fragmentados em micropartículas (WATTEAU *et al.*, 2018) ficando passíveis de transporte e interação, não apenas com os componentes minerais do solo, como também com a endofauna, o sistema radicular e a solução existente no solo.

De acordo com Rillig *et al.* (2021), os microplásticos causam efeitos indiretos nos solos por modificarem a estrutura do solo e conseqüentemente sua densidade, o que pode afetar a resistência à penetração de raízes, e mudanças na capacidade de retenção de água. Contudo, estudo recente de Lehmann *et al.* (2021) utilizando microfibras de plásticos, em condições controladas, não demonstrou o efeito negativo dos microplásticos na estabilização de agregados. A diversidade das características dos microplásticos ocorre devido a adição de variados tipos de aditivos químicos, o que conseqüentemente gera efeitos ambientais diversos (RILLING *et al.*, 2021). A toxicidade dos microplásticos, por exemplo, afeta os fungos micorrízicos colonizadores de raízes, não apenas devido às características dos microplásticos, mas sim de uma complexa relação que inclui também as características do solo, e dos próprios microrganismos.

Trabalhos focados nos meios aquáticos forneceram o amparo inicial às investigações sobre microplásticos nos solos. Esses estudos demonstraram que por elutriação (CLAESSENS *et al.*, 2013) e pela flotação (CLAESSENS *et al.*, 2013; HIDALGO-RUZ *et al.*, 2012), utilizando soluções saturadas, é possível a separação dos microplásticos de outros sedimentos. Assim, cloreto de sódio (densidade 1,2 g cm<sup>-3</sup>), brometo de sódio (densidade 1,4 g cm<sup>-3</sup>), cloreto de zinco (densidade 1,7 g cm<sup>-3</sup>), empregados nos trabalhos em materiais marinhos, fossem eles sedimentos ou água, passaram a ser utilizados também em solos para isolá-los da matriz pedológica. Apesar disso, Radford *et al.* (2021) dizem que a falta de métodos padronizados para a detecção e quantificação de microplásticos é um grande obstáculo para determinar o risco que eles representam nos solos.

A presença de material orgânico nas amostras tende a dificultar a separação de microplásticos da matriz do solo. Assim, a digestão de matéria orgânica é um processo recomendado pelos estudos já realizados (WU *et al.*, 2020; RADFORD *et al.*, 2021). O uso de

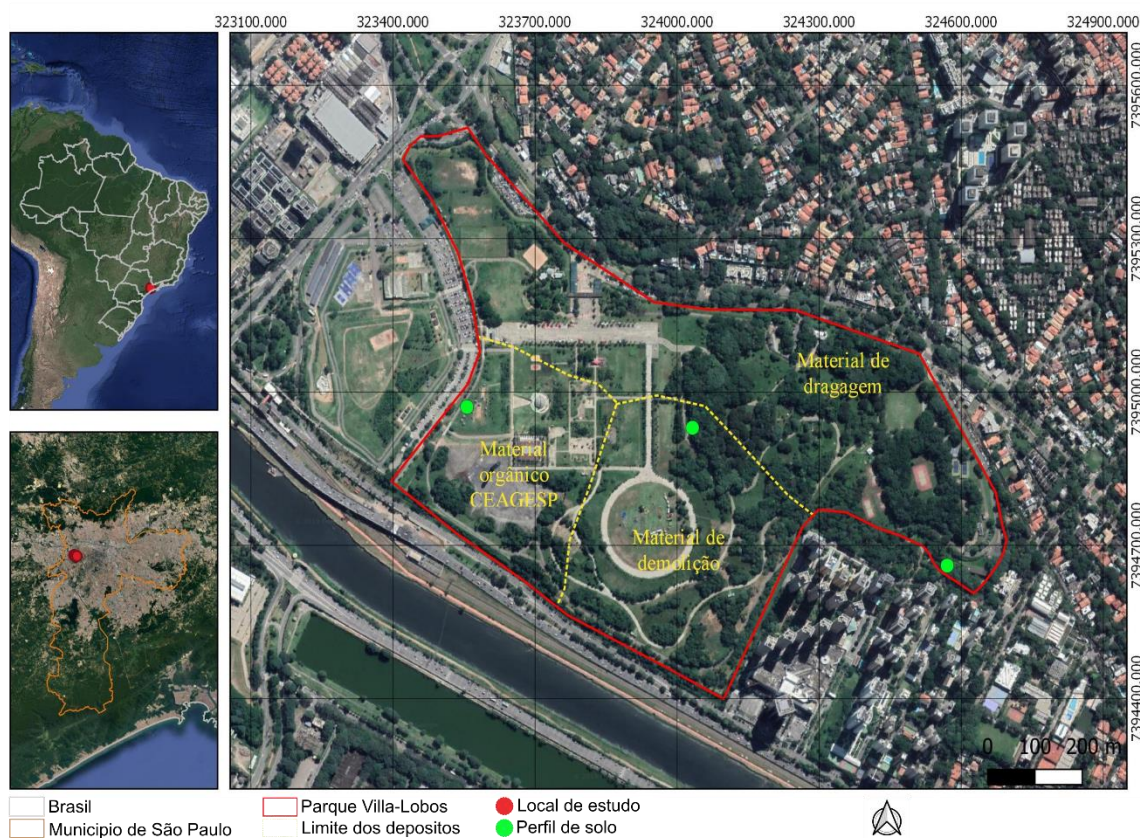
peróxido de hidrogênio é o principal método empregado para a retirada da matéria orgânica, variando a concentração (NUELLE *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2018). Tratando da relação entre tipos diferentes de solos e microplásticos, Luo *et al.* (2020) demonstraram que ocorre um processo de sorção superficial entre esses dois elementos, em função dos tipos de argilominerais e textura do solo. A sorção decresce em decorrência do aumento do pH do solo. Para os autores, a interação eletrostática e a interação hidrofóbica foram os mecanismos dominantes para a ocorrência de sorção.

## 4 – Materiais e Métodos

### 4.1 – Materiais

O trabalho foi realizado na zona oeste do município de São Paulo, mais precisamente no Parque Villa Lobos (**Figura 4**), na margem direita do Rio Pinheiros. O local foi alvo do projeto “Avaliação, percepção e remediação ambiental no Parque Villa-Lobos: um caso de revitalização e requalificação Urbano”, promovido pelo Departamento de Ciências Ambientais (DCA) da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), em convênio com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente/Coordenadoria de Parques Urbanos de acordo com a Portaria CG-44, de 2018 a 2022, tendo como integrante da equipe a orientadora da presente pesquisa de doutorado. Esta área foi escolhida por representar uma área verde instalada em um ambiente anteriormente degradado, sendo possível estabelecer mais facilmente o tempo inicial ( $t_0$ ) do processo de estruturação do solo, a partir do conhecimento do período no qual foram realizadas as últimas grandes intervenções para a construção do parque no local.

**Figura 4:** Área de estudo



Imagens disponíveis gratuitamente no portal GeoSampa da Prefeitura de São Paulo ([https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/\\_SBC.aspx](https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx)). Zona UTM 32 K. Elaborado pela autora.

O Parque Estadual Villa-Lobos está localizado na planície fluvial do Rio Pinheiros, que de acordo com Coutinho (1980), é composta por material aluvionar quaternário. O município está sob influência do clima classificado como Cfb, segundo Köppen e Geiger, e, portanto, possui verão quente e chuvoso e inverno ameno, com temperatura média anual de 18,5 °C e pluviosidade média anual de 1340 mm (ALMEIDA, 2016). Hoje, segundo IBGE (2010), a subprefeitura de Pinheiros, na qual está o terreno do parque, registra densidade demográfica de 9,14 mil habitantes km<sup>2</sup>. O Parque Villa-Lobos possui enorme importância, não apenas para a população do entorno, como também para a zona oeste como um todo, o que inclui além da região de Pinheiros, a Lapa e o Butantã, três bairros que juntos possuem população superior a 1 milhão de habitantes, segundo dados do censo populacional (IBGE, 2010).

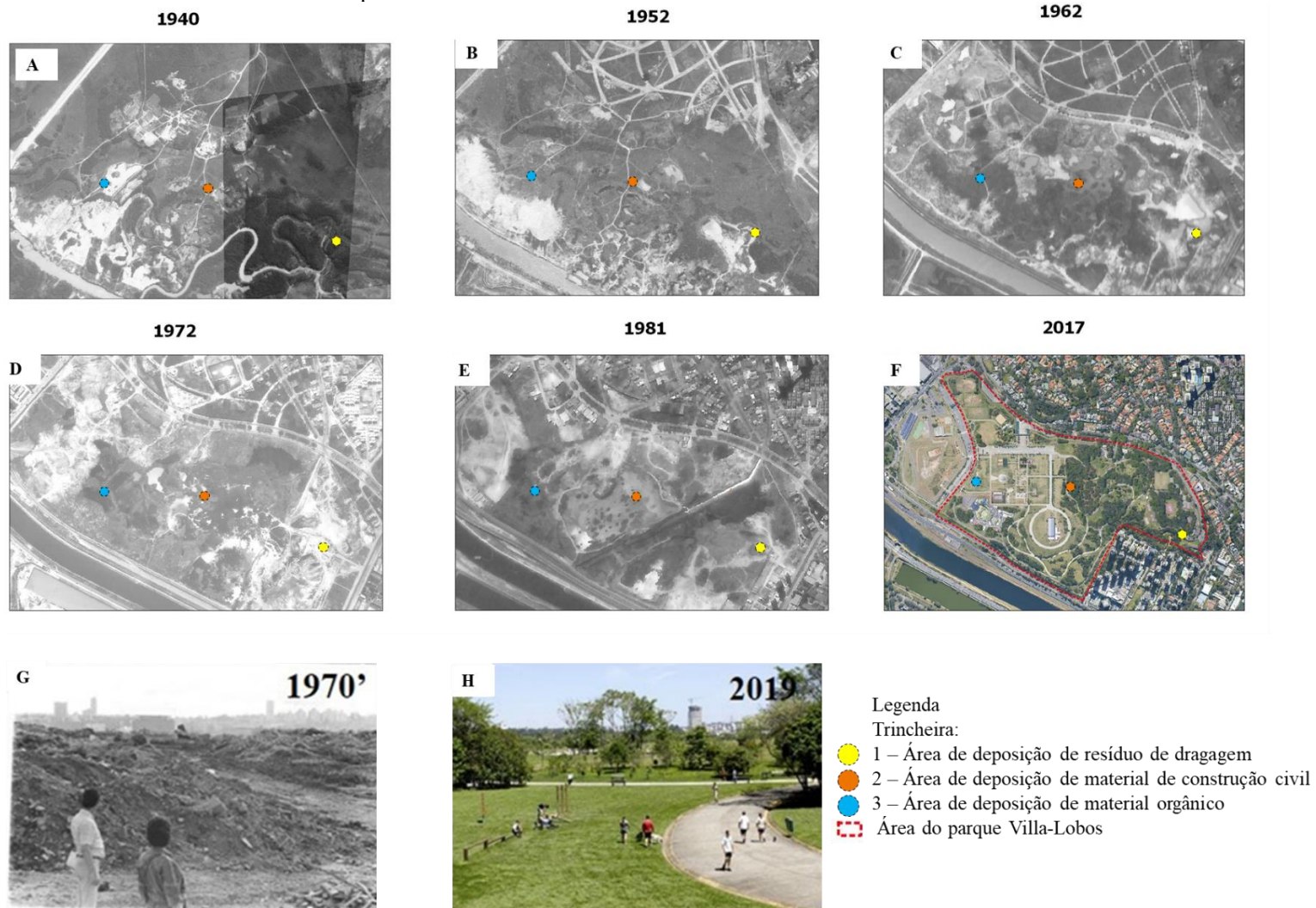
O terreno do parque era local de deposição de resíduos de origem diversa até o final da década de 80 e, em 1987, em razão do centenário de nascimento de Heitor Villas-Lobos, os primeiros estudos para a implantação do parque foram apresentados. De acordo com Laruccia (2004), trabalho de terraplenagem em 1989, a construção de galerias de águas pluviais, a demarcação da área com grades e a escavação de lagos, marcaram o início da transformação de um enorme depósito de lixo, com solo heterogêneo, praticamente estéril e incapaz de absorver água, em uma importante área de verde da cidade (**Figura 5**).

De acordo com Laruccia (2004), cerca de 400 mil metros cúbicos de entulhos foram retirados da área e outros 1,6 milhões foram espalhados pelo terreno, formando uma camada que pode alcançar sete metros de espessura, com presença de entulho da construção civil, resíduos orgânicos de origem doméstica e da Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), e sedimentos de dragagem do Rio Pinheiros (**Figura 5**).

De acordo com Pinto (1987), os canteiros de obras brasileiros produzem entulhos compostos basicamente por argamassa (64%), tijolos e blocos (30%), e outros materiais (6%), dentre eles concreto, rocha, solo, plástico, madeira e metais. Muitos dos materiais presentes nos entulhos são considerados como potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, com destaque para o betume, polímeros no geral, gesso, matéria orgânica e amianto. Os entulhos são compostos basicamente, em termos químicos, por sílica, alumina e óxidos e carbonatos de cálcio (ANGULO e JOHN, 2002).



**Figura 5:** Características do terreno estudado em diferentes períodos



**Fontes:**

Imagem A: Foto aérea de 1940 – Portal da prefeitura de São Paulo (Geosampa)  
 Imagem B: Foto aérea de 1952 – LASERE/USP  
 Imagem C: Foto aérea de 1962 – LASERE/USP  
 Imagem D: Foto aérea de 1972 – LASERE/USP

Imagem E: Foto aérea de 1981 – LASERE/USP

Imagem F: Ortofoto de 2017 - Portal da prefeitura de São Paulo (Geosampa)

Imagem G: Fotografia do terreno ocupado pelo parque Villa-Lobos na década de 70'

Imagem H: Fotografia do terreno ocupado pelo parque Villa-Lobos no ano de 2019 - GESP

Na Imagem A o terreno antes do processo de terraplanagem, onde é possível perceber meandros do rio Pinheiros dentro da área hoje ocupada pelo Parque Villa-Lobos; imagem B mostra o terreno após o processo de retificação o rio Pinheiros; imagens C a E mostram diferentes períodos anteriores a inauguração do parque; imagem F mostra o terreno no ano de 2017; imagem G mostra material antropogênico dentro da área onde está o parque em 1970; imagem D mostra uma visão oblíqua do parque em 2019.

A partir de dados sobre a atual produção de resíduos, principalmente orgânicos, produzidos pelo CEAGESP é possível inferir algumas características dos que foram depositados no terreno do Parque Villa-Lobos durante a segunda metade do século XX. Estima-se que são produzidos entre 100 e 150 toneladas de resíduos diariamente, composto por alimentos que perderam a qualidade para comercialização, como também por embalagens plásticas e de papelão (FAGUNDES *et al.*, 2012). Hoje, os produtos depositados em aterros são em sua maioria compostos por resíduos orgânicos de origem vegetal e animal, enquanto que plásticos e papel são inseridos em processo de reciclagem (FAGUNDES *et al.*, 2012), fato que possivelmente era menos frequente durante o século passado.

Segundo Lima (2008) os resíduos de dragagem quando depositados sobre o solo podem ocasionar alguns problemas ambientais, como a contaminação desse solo devido às características do próprio material. Um composto formado pela decomposição de material orgânico presente no fundo dos rios pode levar à formação de chorume. Além disso, em locais urbanos esse material dragado pode conter elementos tóxicos, como o chumbo. Ainda segundo o autor citado, do canal do Rio Tietê e do Rio Pinheiros os principais materiais dragados ao longo do século XX eram compostos por argila e areia e ricos em matéria orgânica.

## **4.2 – Métodos**

### **4.2.1 – Levantamento dos solos no campo**

Os solos da área foram estudados inicialmente a partir da abertura de três trincheiras, para fins de descrição morfológica do perfil completo. Cada uma das trincheiras teve sua localização definida de modo a haver representação das três áreas de depósito de materiais antrópicos: material de dragagem, material orgânico e material de construção. Os horizontes identificados nestas trincheiras foram amostrados e encaminhados para análises laboratoriais para fins de caracterização e classificação. Para a descrição e coleta dos solos, foi adaptada a descrição morfológica padrão de Schoeneberger *et al.* (2012) e Santos *et al.* (2015), incluindo o detalhamento sobre as características de artefatos antrópicos (quantidade, tamanho, forma, cor e possível constituição). A descrição das estruturas dos solos foi realizada considerando os quatro tipos de estruturas descritos por Santos *et al.* (2015).

Em campo, os horizontes de cada perfil de solo foram amostrados por diferentes técnicas (**Tabela 6**) de acordo com as necessidades de cada análise pretendida. A tabela 6 indica ainda as análises realizadas em cada horizonte, assim como aponta alguns dados das estruturas que são apresentados em detalhes no item resultados.

**Tabela 6:** Amostragens realizadas durante os trabalhos de campo e síntese das análises realizadas

Tipo de amostra	Finalidade	Quantidade total de amostras
Blocos	MLT	7
Blocos	Lâminas delgadas	7
Torrões	Densidade aparente	26 pontos amostrais
Torrões	DMP <sub>s/u</sub>	18 pontos amostrais
Deformada	Demais análises	28

**Análises realizadas por horizontes**

Perfil	Hoz.	Estr.	Ds	Dp	Pt	Gran.	Arg. Disp.	MLT	Micro	DMP <sub>s/u</sub>	Inf/Cond	MP	Raman	FTIR	Química básica	pH	COT	Est. Carb	Metais	DRX	ATG	Ox.	MEV torrões	MEV lâminas
1	1	B/G																						
	2	B/G																						
	3	B/L																						
	4	M																						
	5	M/B																						
	6	M																						
	7	M																						
	8	M																						
	9	M																						
2	1	B/G																						
	2	B/G																						
	3	GS																						
	4	M																						
	5	M																						
	6	M																						
	7	M																						
	8	GS																						
	9	M																						
10	1	B/G																						
	2	B																						
	3	B																						
	4	B																						
	5	B/G																						
	6	B																						
	7	M																						
	8	M																						
	9	M																						
	10	B																						

MLT=Multi-stripe laser triangulation; DMP<sub>s/u</sub>=Diâmetro médio ponderado seco e Diâmetro médio ponderado úmido; Hoz=horizontes; Est.= estruturas; B/G+ blocos e granular; M= maciça; B/L= blocos e laminar; M/B= maciça e blocos; GS= grãos soltos; B= blocos; Ds = densidade do solo; Dp= densidade da partícula; Pt= porosidade total; Gran. = granulometria; Arg.Disp.= argila dispersa em água; MLT= multi lazer triangulation; Micro= micromorfologia; Inf/Cond= infiltração e condutividade hidráulica; MP= microplásticos; COT= carbono orgânico total; Est.Carb.= estoque de carbono. Em azul claro as análises realizadas e em cinza as análises não realizadas. Elaborado pela autora.

#### 4.2.2 – Escaneamento por “Multi-stripe laser triangulation (MLT)”

A utilização da varredura com *multi-stripe laser triangulation* (MLT) possibilita a análise de modo não destrutivo dos agregados dos solos com até 1 cm<sup>3</sup>, fornecendo informações sobre a morfologia dos solos em alta resolução. O método permite extrair dados quantitativos sobre a estrutura e porosidade do material com excelente qualidade de detecção. A técnica consiste em varrer a amostra indeformada com uma série de feixes de laser enquanto uma câmera desloca-se e monitora a deformação e intensidade dos feixes refletidos (HIRMAS *et al.*, 2016).

Foi seguido o protocolo apresentado por Hirmas (2013) e Hirmas *et al.* (2016) em amostras indeformadas de todos os horizontes dos perfis nos quais foi observada em campo a existência de estruturas possivelmente de origem pedogenética. As amostras foram esculpidas, cuidadosamente retiradas dos perfis e acomodadas em recipientes capazes de evitar movimentos bruscos que poderiam levar ao colapso das estruturas. Foram, então, encaminhadas à Universidade da Califórnia-Riverside (UCR), onde foram analisadas pela aluna em questão sob supervisão do Dr. Hirmas.

Cada amostra teve sua superfície exposta, umedecida com água, com posterior aplicação de 1,1-difluoroetano (DFE). O contato entre o DFE e a superfície úmida gera o rápido congelamento dessa superfície, o que permite a fácil retirada da porção congelada do restante do bloco, a fim de expor as partes internas e mais preservadas da amostra (HIRMAS, 2013). Em seguida, cada amostra foi seca em estufa a temperatura de 45 °C por 72 horas para que as linhas de fraquezas e os macroporos do solo fossem evidenciados. Transcorrido o tempo, uma pequena quantidade de solo de cada amostra foi utilizada para determinação da umidade, ou seja, foi determinada a sua umidade inicial após a secagem a 105°.

##### 4.2.2.1 – Escaneamento da superfície

Cada amostra foi escaneada seguindo as recomendações do fabricante sobre a distância entre o equipamento (marca *NextEngine 3D Scanner Ultra HD*) e o objeto. Para o objetivo do estudo, a distância é de cerca de 24 cm. O equipamento permite o escaneamento de uma área retangular de aproximadamente 10 x 30 cm, assim foi obtido mais de uma imagem por amostra, o que resultou na necessidade de unir essas figuras. Para isso, foi utilizado o software *NextEngine Scanner Model* que acompanha o aparelho de scanner.

As imagens foram cuidadosamente unidas a partir de pontos comuns com a menor sobreposição possível. Cada imagem era formada por uma nuvem de pontos que possuíam

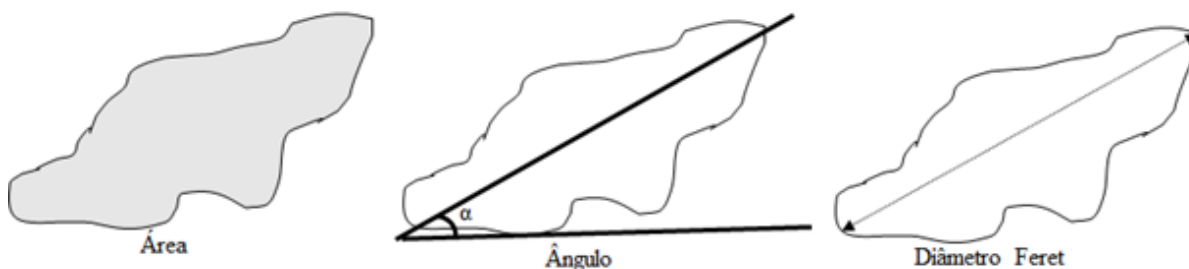


localização espacial conhecida (x, y, z). Ao fim do processo, cada imagem foi salva no formato \*xyz em um bloco de notas, ou seja, um arquivo .txt. Os arquivos foram abertos no software R, onde foi gerado um arquivo .tif com resolução definida em 0,15 ppp (pontos por polegada) para equivaler a resolução do scanner.

O objetivo do uso do MLT foi identificar estruturas e obter informações de suas métricas a partir da contração após aquecimento, o que permitiu a exibição dos planos de fraqueza. Assim, concentrou-se na caracterização dos poros. No *software* ImageJ utilizou-se a ferramenta “*Analyse Particles*”, extraindo-se os parâmetros área, ângulo e diâmetro de Ferret (paquímetro máximo) para cada poro, além da porcentagem de poros de cada amostra, sendo o arquivo então salvo em formato bloco de notas.

A área representa a área, em pixel, ocupada por cada poro; o ângulo representa a inclinação de cada poro, tendo como referência o topo da amostra; e o diâmetro Ferret como sendo o máximo comprimento do poro (**Figura 6**).

**Figura 6:** Parâmetros extraídos pelo software ImageJ



A figura ilustra os parâmetros obtidos por meio do sc pela autora.

Cada arquivo foi aberto no software R para os tratamentos estatísticos, mais especificamente a determinação da frequência do tamanho (área) dos poros, e do ângulo para cada amostra, e ainda o índice de correlação entre área e diâmetro Ferret, sendo utilizados o índice de correlação Pearson. Esse índice considera a existência de uma correlação linear entre duas variáveis contínuas, no caso do estudo seria equivalente ao aumento do diâmetro de Ferret na mesma proporção que aumenta a área (BUSSAB e MORETTIN, 2017).

#### 4.2.2.2 – Escaneamento dos blocos

Finalizada a etapa de escaneamento da superfície da cada amostra, foi iniciado o escaneamento do bloco em 360° para obtenção de uma imagem 3D. Cada amostra, após ter a superfície escaneada, foi fragmentada em dois pedaços seguindo o plano de fraqueza e cada

pedaço também foi escaneado, sendo o mesmo processo repetido diversas vezes (**Figura 7**) a fim de gerar informações em diferentes escalas. Os blocos foram colocados sobre uma plataforma rotacional enquanto o aparelho de escaneamento permaneceu imóvel.

O escaneamento dos blocos para gerar uma imagem 3D necessita de dois momentos de escaneamento, os quais geram duas famílias de 6 imagens automaticamente unidas pelo equipamento, porém o alinhamento das duas famílias foi realizado manualmente no software NextEngine. Para facilitar e aumentar a precisão na identificação de pontos comuns entre os dois conjuntos de imagens e, portanto, alcançar melhor qualidade do produto ao unir as famílias, foram colocadas pequenas tachinhas coloridas nos blocos.

Para cada amostra foi definido o volume por meio do software NextEngine Scanner Model e a massa após pesagem, bem como a umidade para determinação do fator de correção. Com o intuito de buscar a relação entre raio e a massa dos blocos foi utilizado o valor da raiz quadrada do volume posteriormente transformado em valor de diâmetro, tal qual fez Giménez *et al.* (2002) seguindo as relações existentes em uma esfera. Foi seguido o protocolo de Hirmas *et al.* (2013) para identificação do comportamento fractal por meio da equação da reta ao associar massa do bloco com o diâmetro, de modo que valor de  $x$  entre 2,5 e 3 indicam tendência de comportamento fractal.

**Figura 7:** Escaneamento dos blocos



A imagem da esquerda representa os níveis de obtenção de agregados para o escaneamento e obtenção de imagens 3D. A imagem da direita mostra o sentido do escaneamento para obtenção de 2 famílias de imagens, as quais são unificadas em software. É possível ver na imagem da direita as tachinhas coloridas colocadas nas amostras para facilitar a união das famílias. Elaborado pela autora.

Foi definida a dimensão fractal ( $D_f$ ) dos agregados de acordo com a **Equação 8**, técnica que busca, de modo mais incisivo, a identificação da tendência de repetição de forma, assim como ocorre, por exemplo, no padrão repetitivo dos flocos de neves de Koch (**Figura 8**), em que, independentemente da escala de observação, a imagem se repete (MANDELBROT, 1983).

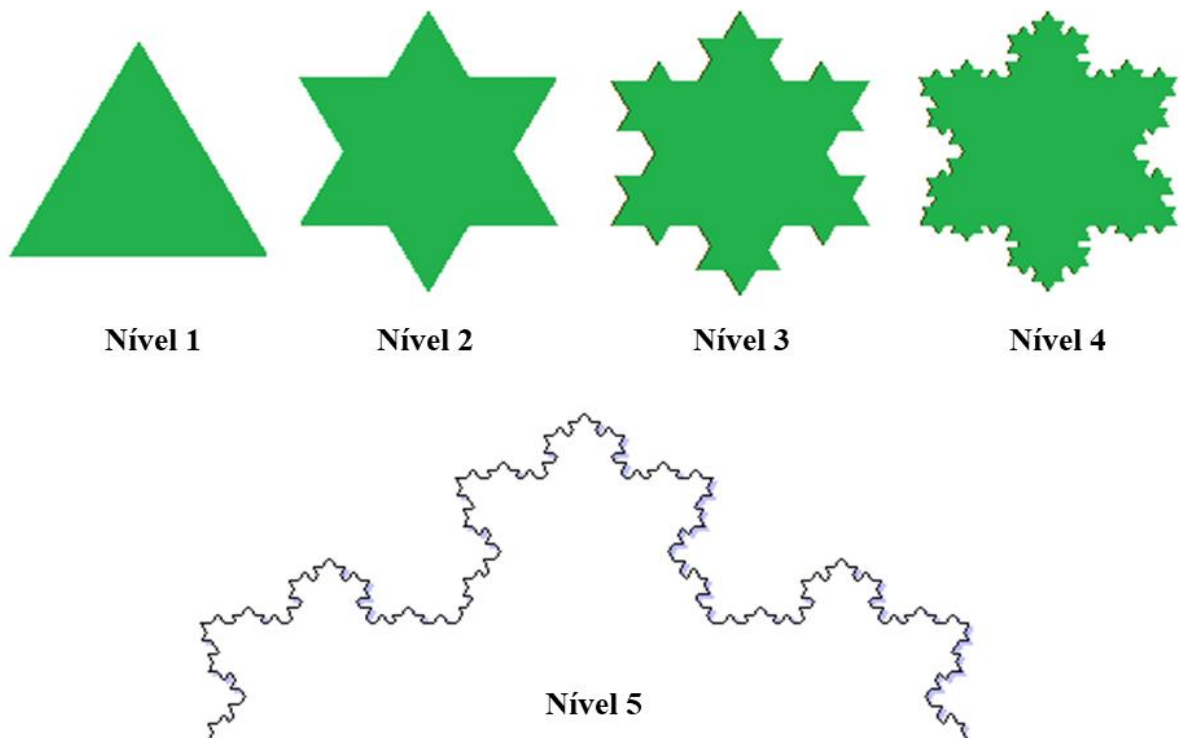
A utilização do modelo fractal para a análise do padrão de agregação do solo já foi aplicada em diversos estudos e tem demonstrado ótimos resultados (PACHEPSKY *et al.*, 2000; YOUNG e CRAWFORD, 1991).

$$M(d) = k_m d^{D_m}$$

**Equação 8**

Onde:  $M(d)$  é a massa do agregado de diâmetro  $d$ ;  $k_m$  representa a massa do agregado por unidade de diâmetro  $d$ ; e  $D_m$  é a própria dimensão fractal.

**Figura 8:** Modelo fractal de Koch



A imagem representa uma das primeiras representações de fractal. Organizada por Koch, a imagem apresenta o padrão geométrico existente em um floco de neve. Adaptado de Mandelbrot (1983). Elaborado pela autora.

A geometria fractal assume que a partir da relação entre perímetro e área da forma há uma relação geométrica entre os valores que figura entre 2 e 3 (MANDELBROT, 1983). Porém, para os agregados dos solos, o valor é obtido por meio de dados de diâmetro médio, raio, massa, e densidade aparente e essa relação entre duas dessas variáveis não ocorre nos mesmos intervalos de valores dados pela geometria fractal, podendo haver  $D_f$  pouco acima de 3, assim  $D_f < 2$  ou  $> 3$ . Essa discordância ocorre pelo fato dos componentes dos solos que formam os agregados serem muito distintos entre si, assim, o valor de  $D_f$  tende a divergir dos valores da geometria fractal clássica conforme a escala de análise se aproxima dessas partículas. Assim,

quanto menores os agregados, maior a divergência dos valores de  $D_f$  em relação ao intervalo entre 2 e 3 (PACHEPSKY *et al.*, 2000; MILLÁN e ORELLANA, 2001).

#### **4.2.3 – Análises micromorfológicas**

A análise em escala em microscópio óptico permite a caracterização qualitativa dos tipos e tamanhos de agregados e uma caracterização qualitativa e quantitativa dos tipos, tamanhos e graus de conectividade (bidimensional) dos poros, o que auxilia na descrição e compreensão do comportamento hídrico do solo e dos processos pedogenéticos (CASTRO *et al.*, 2003).

Amostras indeformadas foram coletadas em campo e foram preparadas conforme Murphy (1986), o que significa que foram secas ao ar e impregnadas a vácuo com uma mistura de resina de poliéster e monômero estireno (proporção 2:1). Os próximos passos, após o endurecimento da resina, consistem em uma série de polimentos em disco rotativo com pó abrasivo de óxido de alumínio para cada bloco.

Parte do bloco foi cortada e colada em lâmina de vidro, desgastada com serra diamantada e poltriz e polida manualmente com pó de óxido de alumínio, até atingir a espessura de 30  $\mu\text{m}$ . As lâminas resultantes foram direcionadas para descrição micromorfológica do solo. A descrição das lâminas é uma análise majoritariamente qualitativa que permite uma caracterização da pedalidade, da microestrutura, do material grosso, do material fino, dos poros, entre outros elementos. A descrição foi realizada conforme a nomenclatura e os conceitos estipulados por Bullock *et al.* (1985) e Stoops (2003).

A análise foi conduzida em amostras selecionadas nos horizontes dos perfis. O procedimento de preparação das lâminas foi realizado no Laboratório de Laminação do Departamento de Ciência Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP). Já a análise das lâminas e a descrição em microscópio óptico foram realizadas no Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica – LDMP, no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP).

#### **4.2.4 – Análises físicas**

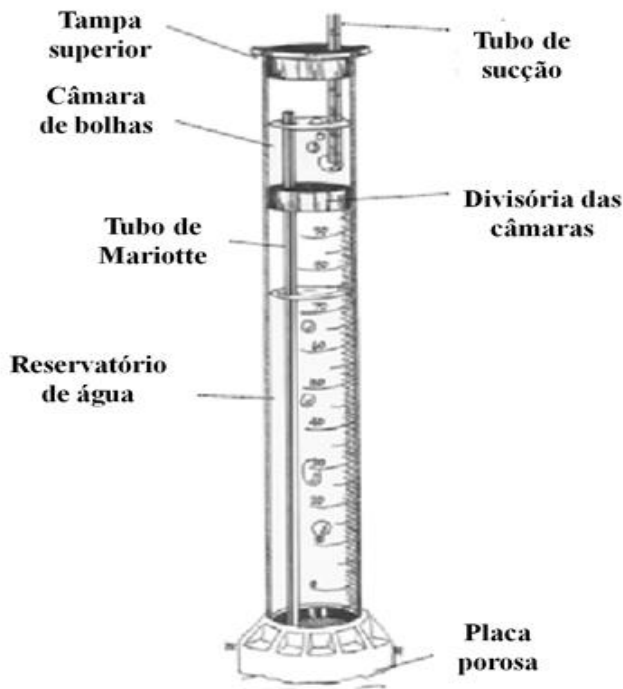
O conjunto de análises expostas a seguir oferece suporte para o conhecimento dos tipos de estrutura e do comportamento físico-hídrico dos solos e, conseqüentemente, do papel destes solos na regulação do ciclo hidrológico em ambiente urbano.

#### 4.2.4.1 – Infiltração e Condutividade hidráulica não saturada

O ensaio de infiltração foi realizado em campo, em diferentes horizontes dos perfis de solo, com prioridade àquelas nas quais foi identificada a presença de estruturas pedogenéticas. Utilizou-se um infiltrômetro de tensão, o *Minidisk Infiltrometer* (Decagon), seguindo as recomendações do fabricante (MINI DISK INFILTRMETER, DECAGON DEVICE, ESTADOS UNIDOS, 2016).

O aparelho é ideal para medições em campo devido ao seu tamanho compacto, a baixa quantidade de água necessária para sua operação, em comparação com infiltrômetros maiores, como o de Guelph, e por permitir o controle da sucção aplicada nos ensaios. O equipamento é composto por um tubo de acetato graduado dividido em duas câmaras, um tubo de sucção na tampa superior com potencial que varia de 0,5 a 6 cm de sucção, um disco de aço inoxidável e uma placa porosa na parte inferior que não permite o vazamento da água (**Figura 9**).

**Figura 9:** O Minidisk Infiltrometer (Decagon)



A imagem da esquerda mostra, de modo esquemático, o infiltrômetro com todos os seus componentes, enquanto que a imagem da direita o infiltrômetro em funcionamento em campo. A figura da esquerda é adaptada do manual do produto (MINI DISK INFILTRMETER, DECAGON DEVICE, ESTADOS UNIDOS, 2016) e a figura da direita é uma fotografia da autora da tese.

Para determinar a infiltração no solo, as câmaras superior e inferior do infiltrômetro foram preenchidas com água não destilada, e na câmara superior (ou câmara de bolhas) foi feito o controle de sucção. A escolha por não utilizar água destilada teve como objetivo não causar

desequilíbrio na solução que pudesse levar à fragilização da estrutura do solo. A câmara inferior forneceu o volume de água para infiltração no solo à uma taxa determinada pela sucção selecionada na câmara de bolhas (de 0,5 a 6 cm). A câmara inferior, por ser um cilindro graduado, permitiu a visualização e determinação do nível de água ao longo do tempo, em mL. Foi registrada a variação do volume da água em intervalo de tempo de 30 segundos até que a taxa de infiltração se mantivesse constante por 3 leituras consecutivas, como indicado pelo fabricante do equipamento.

Os dados de campo foram plotados em uma planilha para cálculo da infiltração, definida como a entrada de água no solo por unidade tempo (LIBARDI, 2005). A partir desse dado, calculou-se a condutividade hidráulica não saturada, definida como a quantidade de água que segue um ponto a outro, dentro de um unidade espacial, que não na capacidade de campo (LIBARDI, 2005). A medição da infiltração acumulada em função do tempo até a constância na leitura foi feita seguindo as recomendações de Zhang (1997), o que permitiu a determinação da sorvidade, e dos valores de A1 e A2, conforme exposto nas equações 5, 6 e 7, descritas no item 3.3 (Revisão Bibliográfica). Por fim, foi calculada a infiltração (**Equação 9**),

Para a efetiva determinação da condutividade hidráulica (**Equação 10**) os valores de sucção foram associados com a textura do solo e com os valores do parâmetro de van Genuchten existentes em planilha no formato .xls que acompanha o equipamento.

$$I = C1t + C2\sqrt{t} \quad \text{Equação 9}$$

$$K = \frac{CI}{A} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: I corresponde a Infiltração; C1 (m/s<sup>-1</sup>) é o parâmetro relativo à condutividade hidráulica; C2 (m/s<sup>-1/2</sup>) é a sorvidade do solo; t (segundos) ao tempo; K é a condutividade hidráulica; A corresponde ao parâmetro de van Genuchten.

O ensaio de infiltração foi realizado em campo, em diferentes horizontes dos perfis de solo, com prioridade àquelas nas quais foi identificada a presença de estruturas pedogenéticas. Os dados de condutividade hidráulica foram obtidos para os mesmos horizontes.

#### **4.2.4.2 – Diâmetro Médio Ponderado (via seca e úmida) e Índice de Estabilidade de Agregados**

Essas análises fornecem informações sobre a representatividade dos tamanhos dos agregados no solo (NIMMO e PERKINS, 2002; SALTON *et al.*, 2012) e sobre sua resistência mecânica à desagregação (BRONICK e LAL, 2005). Foram realizados ensaios a partir da

adaptação dos métodos de Salton *et al.* (2017), Salton *et al.* (2012) e Nimmo e Perkins (2002), todos frutos do método padrão de Yooder, o que justifica o fato da análise ser normalmente chamada de teste de Yooder.

A determinação do Diâmetro Médio Ponderado via seca (DMPs) e do Diâmetro Médio Ponderado via úmida (DMPu) utiliza dados referentes ao diâmetro dos agregados retidos em cada peneira dentre um conjunto de peneiras previamente selecionadas. A esse diâmetro é dado o nome de “diâmetro médio das classes” (Wis), o qual é calculado pela média aritmética entre os limites das peneiras superior e inferior.

Blocos de solo coletados em campo foram transferidos cuidadosamente para o laboratório e manuseados em ponto de friabilidade. O material foi manualmente fragmentado de modo que a amostra transpassasse a peneira de malha 9,52 mm e, ao fim do processo, o material foi seco ao ar por 3 dias. Para a etapa seguinte foram selecionados agregados superiores a 2 mm, ou seja, a análise utilizou agregados entre 9,52 mm e 2 mm de diâmetro. Todos os agregados selecionados foram cuidadosamente observados para identificação de raízes soltas e essas raízes foram cortadas.

Para a determinação do DMPs, 25 g de amostra foram peneiradas durante 1 minuto com potência de 30% em agitador eletromagnético de peneiras utilizando um conjunto de peneiras com abertura de malha de 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,106 mm, 0,053 mm mais o fundo. O conteúdo de amostra retido em cada peneira foi levado à estufa a 105° por 4 horas utilizando recipiente de massa conhecida, sendo o recipiente com a amostra posteriormente pesados para determinar a massa e o percentual dos agregados retidos em cada peneira. Da massa encontrada foi subtraída a massa correspondente à possíveis materiais grossos de diâmetro igual ou superior à malha de cada peneira. Para tanto, o material retido em cada peneira foi transferido para dispersor de solo eletrônico e foi adicionada solução dispersante (NaOH 1 N) para agitação por 10 minutos. Posteriormente a amostra foi lavada sobre a peneira correspondente e o material retido foi transferido para recipiente de massa conhecida para secagem em estufa a 105° por 4 horas.

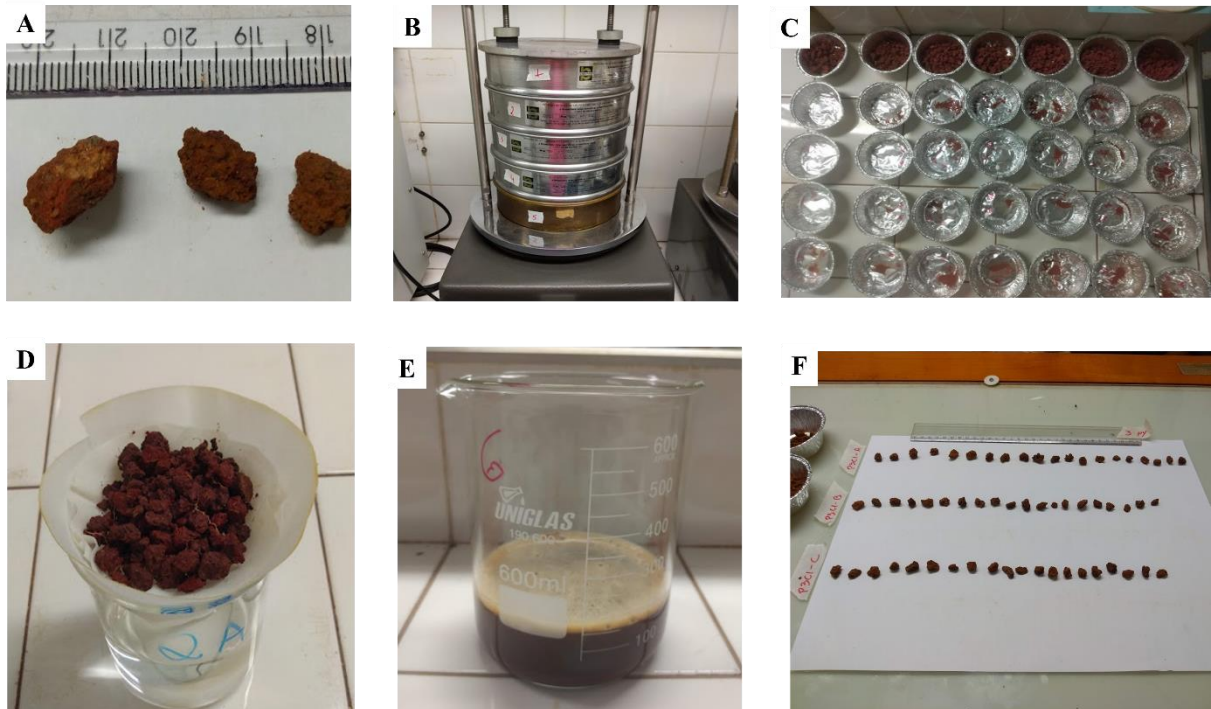
O DMPu foi obtido com 25 g de amostra com diâmetro entre 9,52 mm e 2 mm, saturada via capilaridade durante 16 horas utilizando água não destilada ou deionizada. Transcorrido o tempo, as amostras foram levadas a um conjunto de peneiras 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,106 mm. O conjunto de peneiras foi acoplado ao agitador com oscilação vertical dentro de um recipiente com água não destilada ou deionizada. Então, houve a agitação por 15 minutos a 30 oscilações por minuto. As peneiras foram, então, retiradas e a água do recipiente depositada



sobre peneiras de 0,053 mm. Com o uso de jato de água, o material retido em cada peneira foi transferido para latas de alumínio de massa conhecida e seco em estufa à 105 °C por 12 horas para determinação da massa das amostras.

Assim como na determinação do DMPs, foi subtraída da amostra retida em cada peneira a massa correspondente à possíveis materiais grossos de diâmetro igual ou superior à malha. Para tanto, o material retido em cada peneira foi submetido a tratamento similar ao dado às amostras da determinação do DMPs, ou seja, dispersão, lavagem e secagem a 105° por 4 horas. Tanto para o cálculo do DMPs como para o DMPu foi determinado para cada amostra o valor da umidade inicial, a qual possivelmente influenciou a massa de solo utilizada na análise (Figura 10).

**Figura 10:** Etapas na determinação do DMPs e DMPu



A imagem ilustra as etapas para obtenção do DMPs e DMPu. A: tamanho dos agregados utilizados. B: etapa de tamisamento ou peneiramento a seco. C: as amostras após o processo de peneiramento a seco. D: aparato montado com papel filtro e becker para saturação da amostra via capilaridade. E: processo de dispersão para determinação da fração maior que a malha da peneira. F: exemplos de agregados após a secagem, prontos para serem fotografados em mesa de luz. Elaborado pela autora.

Para o cálculo do DMPs em mm, o DMPu em mm e o índice de Estabilidade de Agregados (IEA) em % foram utilizadas as seguintes expressões:

$$DMP_s = \frac{\sum(x_{i_s} * w_{i_s}) * f}{Mt_s} \quad \text{Equação 11}$$

$$DMP_u = \frac{\sum(x_{i_u} * w_{i_u}) * f}{Mt_u} \quad \text{Equação 12}$$



$$IEA = \frac{DMP_u}{DMP_s} * 100$$

### Equação 13

Onde: DMP<sub>s</sub> corresponde ao diâmetro médio ponderado via seca, em mm;  $w_s$  à média aritmética da malha da peneira analisada e da malha da peneira superior;  $x_{i_s}$  à massa de agregados retida na peneira;  $Mt_s$  à massa total de amostra utilizada para determinação de DMP<sub>s</sub>;  $f$  ao fator de correção da umidade; DMP<sub>u</sub> corresponde ao diâmetro médio ponderado via úmida, em mm;  $w_u$  à média aritmética da malha da peneira analisada e da malha da peneira superior;  $x_{i_u}$  à massa de agregados retida na peneira;  $Mt_u$  à massa total de amostra utilizada para determinação de DMP<sub>u</sub>;  $f$  ao fator de correção da umidade.

Os ensaios de DMP<sub>s</sub>, DMP<sub>u</sub> e IEA foram realizados em triplicata em todos os horizontes dos perfis de solo das trincheiras onde foram reconhecidas a existência de estruturas pedogenéticas. O procedimento foi conduzido no Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da USP.

Além da determinação do DMP<sub>s</sub> e DMP<sub>u</sub>, foi utilizada uma mesa de luz para fotografar os agregados com o objetivo de determinar sua circularidade a partir da silhueta e, assim, complementar as informações sobre a sua estabilidade. Foram fotografados 60 *peds* de cada amostra, sendo ainda cada um deles rotacionados por uma ou duas vezes. Após o procedimento de agitação em água e a secagem a 105°C, outros 60 agregados foram aleatoriamente selecionados por amostra na peneira de malha 2 mm e outros 60 na peneira de malha de 1 mm, porém no caso dos retidos na malha de 1 mm a dimensão não permitia a rotação sem perda de material, por isso apenas a fotografia de uma das faces foi tomada, diferentemente dos agregados da malha 2 mm os quais foram rotacionados 2 vezes. Assim, após a agitação no Yooder, foram obtidas 180 fotografias de face dos agregados retidos na malha de 2 mm e 60 fotografias das faces dos agregados retidos na malha de 1 mm.

As fotografias foram trabalhadas no software ImageJ para extração da circularidade e os dados gerados estatisticamente tratados no software R para identificação da frequência e alteração de comportamento dos agregados após terem sido submetidos à análise do Yooder.

#### 4.2.4.3 – Densidade aparente

A densidade aparente, referente à massa do solo por unidade de volume (sólidos + poros), foi realizada pelo método do torrão parafinado descrito por Almeida *et al.* (2017a).

Torrões de solo foram pesados para obtenção de sua massa. Cada torrão foi mergulhado em parafina, posteriormente retirado e encaminhado para secagem ao ar e, em seguida, pesado. Um béquer com água foi colocado sobre uma balança e o conjunto foi tarado. Para obter o volume, foi seguido o “Princípio de Arquimedes”. Assim, o torrão parafinado foi mergulhado por inteiro no béquer a partir de um suporte e o peso obtido foi anotado. O torrão foi retirado e partido com uma faca. Parte do torrão, sem parafina, serviu para determinar a umidade do solo por meio da secagem em estufa a 105 °C. No caso dos horizontes sem a presença de estruturas (torrões), mas de característica maciça, foram utilizados blocos esculpidos, seguindo os mesmos princípios descritos acima. O cálculo da D<sub>s</sub> foi feito a partir das seguintes equações:

$$P_{tor} = \frac{m_{tu}}{1+c} \quad \text{Equação 14}$$

$$P_{parafina} = m_{tp} - m_{tor} \quad \text{Equação 15}$$

$$V_{parafina} = \frac{P_{parafina}}{0,9} \quad \text{Equação 16}$$

$$V_{tor} = (V_a - V_{at}) - V_{parafina} \quad \text{Equação 17}$$

$$D_s = \frac{P_{tor}}{V_{tor}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde: P<sub>tor</sub> corresponde a massa do torrão seco a 105 °C, em kg; m<sub>tu</sub> a massa do torrão úmido, em kg; c a umidade da subamostra, em mg kg<sup>-1</sup>; P<sub>parafina</sub> a massa da parafina, em kg; V<sub>parafina</sub> o volume da parafina, em dm<sup>3</sup>; m<sub>tp</sub> a massa do torrão parafinado, em kg; m<sub>tor</sub> a massa do torrão seco ao ar, em kg; V<sub>tor</sub> o volume do torrão, em dm<sup>3</sup>; V<sub>a</sub> o volume total de água do béquer, em dm<sup>3</sup>; V<sub>at</sub> o volume de água adicionada ao béquer com o torrão, em dm<sup>3</sup>; V<sub>parafina</sub> o volume da parafina, em dm<sup>3</sup>; o valor 0,9 corresponde a densidade da parafina comercial (0,89 a 0,93 g cm<sup>-3</sup>); D<sub>s</sub> a densidade do solo, em kg dm<sup>-3</sup>; P<sub>tor</sub> a massa do torrão seco a 105 °C, em kg; b o volume do torrão, em dm<sup>3</sup>.

Este procedimento foi realizado, em triplicatas, em todos os horizontes dos perfis de solo das trincheiras, no Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da USP.

#### 4.2.4.4 – Densidade da partícula

A densidade da partícula, referente à relação entre massa de solo seco (m<sub>ss</sub>) e o volume das partículas (excluindo-se os poros), foi realizada de acordo com o método do balão volumétrico (BLAKE e HARTGE, 2002). Foram utilizados 20,00 g de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) pesada em balão volumétrico de 50 ml. Então, foi adicionado álcool etílico no balão volumétrico a partir de uma bureta de 50 ml cheia, até que o volume de 50ml fosse atingido no

balão; o volume de álcool gasto na bureta foi então anotado. A diferença entre o volume total da balão (50 ml) e o álcool gasto na bureta representa o volume do solo dentro do balão volumétrico. A densidade de partícula foi calculada pela seguinte fórmula:

$$\rho_p = \frac{mss}{50-b} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:  $\rho_p$  corresponde à densidade de partícula, em  $\text{g cm}^{-3}$ ; mss a massa de solo seco em estufa a  $105^\circ\text{C}$ , em g; 50 ao volume do balão, em ml; b ao volume de álcool gasto, em ml.

Este procedimento foi realizado, em triplicatas, em todos os horizontes dos perfis de solo das trincheiras, no Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da USP.

#### 4.2.4.5 – Porosidade total

A porosidade total do solo expressa o volume total de vazios, sendo calculada a partir dos valores de densidade aparente e de densidade da partícula, assim como posto por Danielson e Sutherland (2006):

$$St = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \quad \text{Equação 20}$$

Onde: St-porosidade total;  $\rho_p$ -densidade do solo;  $\rho_b$ -densidade de partícula. O cálculo foi realizado para todos os horizontes dos perfis de solos, onde foi possível a obtenção de Ds.

#### 4.2.4.6 – Granulometria

A granulometria corresponde à proporção entre as partículas de argila (<0,002 mm), silte (0,002-0,05 mm) e areia (0,05-2 mm) e foi determinada pelo método da pipeta (GEE e DANI OR, 2002). A individualização das partículas foi obtida pelo contato da amostra de solo, menor que 2 mm previamente seca ao ar, com dispersantes químicos (hexametáfosfato de sódio  $0,038 \text{ mol L}^{-1}$  + hidróxido de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e a agitação do conjunto solo + dispersante em agitador de Wagner.

Após a dispersão, alíquotas das frações silte + argila e argila foram pipetadas, segundo a Lei de Stokes. A fração areia total foi separada por peneiramento, seca e fracionada considerando os intervalos granulométricos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a USDA (BURT, 2004): areia muito grossa (1 a 2 mm), areia grossa (0,5 a 1 mm), areia média (0,25 a 0,5 mm), areia fina (0,125 a 0,25 mm) e areia muito fina (0,125 a 0,05 mm). Todas as frações separadas foram secas em estufa ( $105$  a  $110^\circ\text{C}$ ) e posteriormente pesadas. A

determinação das frações granulométricas foi a partir das seguintes equações, adaptadas de Donagemma e Viana (2017):

$$S_m = (((m_{at} - m_{ar}) * f) / m_i) + (((m_{sa} - m_{ar}) * f) / m_i * R_v) + (((m_{ar} - m_{br}) * f) / m_i * R_v) \quad \text{Equação 21}$$

$$m_{at} = \text{massa da fração areia seca em estufa} \quad \text{Equação 22}$$

$$T_s = ((m_{sa} - m_{ar}) * f) / m_i * R_v * (1000 / S_m) \quad \text{Equação 23}$$

$$T_{arg} = ((m_{ar} - m_{br}) * f) / m_i * R_v * (1000 / S_m) \quad \text{Equação 24}$$

Onde:  $S_m$  corresponde ao Somatório das massas;  $m_{at}$  a areia total;  $m_{ar}$  a massa de argila, seca em estufa, em g;  $f$  ao fator de correção de umidade;  $m_i$  a massa inicial da amostra;  $m_{sa}$  a soma da massa de silte e argila, seca em estufa, em g  $kg^{-1}$ ;  $R_v$  a razão do volume pipetado para o volume total da proveta;  $m_{br}$  a massa do branco, em g;  $T_s$  a concentração de silte, em g  $kg^{-1}$ ;  $S_m$  ao somatório das massas das frações, em g;  $T_{arg}$  a concentração de silte, em g  $kg^{-1}$ .

Tal ensaio foi realizado nas amostras de todos os horizontes dos perfis das trincheiras e foi conduzido no Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da USP considerando como margem máxima de erro 2% de perda de material.

#### 4.2.4.7 – Argila dispersa em água e grau de floculação

O conhecimento da proporção de argila dispersa em água (ADA) permite o cálculo do grau de floculação (GF) do solo, o qual varia em função da mineralogia da fração argila e da textura do solo. A análise da ADA foi realizada conforme o método de Donagemma e Viana (2017). A técnica é similar à utilizada para granulometria e descrita anteriormente, com a diferença de não haver o acréscimo de dispersante químico e limitar a coleta à 1 alíquota, conforme o tempo de sedimentação da argila segundo a lei de Stokes. Assim, foi calculada a ADA e o GF a partir das seguintes expressões:

$$T_{arg} = \frac{(m_{ar} - m_b) * f * 1000}{m_i * R_v} \quad \text{Equação 25}$$

$$G_{Flo} = \frac{a - T_{arg}}{a} * 100 \quad \text{Equação 26}$$

Onde:  $T_{arg}$  corresponde a concentração de argila dispersa em água, em g  $kg^{-1}$ ;  $m_i$  a massa inicial da amostra, em g;  $m_{ar}$  a massa de argila, seca em estufa, em g;  $m_b$  a massa da prova em branco, seca em estufa, em g;  $R_v$  a razão do volume pipetado para o volume total da proveta descontado o volume retirado na primeira pipetagem;  $f$  ao fator de correção de umidade para a massa inicial;  $G_{Flo}$  ao grau de floculação, em %;  $a$  concentração de argila total, em g  $kg^{-1}$ .

Tal ensaio foi realizado nas amostras de todos os horizontes dos perfis das trincheiras e foi conduzido no Laboratório de Pedologia, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo (USP).

#### **4.2.5 – Análises químicas**

As propriedades químicas dos solos expostas a seguir podem influenciar diretamente os processos de dispersão e floculação, sendo, portanto, necessárias para a compreensão da formação e/ou estabilidade de agregados na área de estudo.

##### **4.2.5.1 – Análises químicas de rotina**

###### **4.2.5.1.1 – pH em H<sub>2</sub>O e pH em KCl**

O pH em água deionizada (H<sub>2</sub>O), na proporção 2,5:1, e em cloreto de potássio (KCl), na proporção de 1:1, foram determinados de acordo com Thomas (1996). Em suma, foram pesadas 10g de terra fina seca ao ar (TFSA) e adicionados 25 ml de água deionizada ou 10 ml de KCl 1N, com posterior agitação até total contato da amostra com a solução. Em seguida, cada amostra ficou em repouso por 1 hora, com agitação manual em alguns momentos durante este período. Por fim, a leitura do pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ou pH<sub>KCl</sub> foi realizada com o medidor de pH devidamente calibrado. Os resultados foram utilizados no cálculo do delta pH ( $\Delta$ pH) (**Equação 27**), que fornece uma estimativa do domínio das cargas dos colóides dos solos:

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$$

**Equação 27**

Estas análises foram realizadas em todas as amostras das trincheiras, em triplicatas, no Laboratório de Química para fins de Classificação do Solo do Departamento de Ciência Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP).

###### **4.2.5.1.2 – Cátions trocáveis e CTC**

Cátions trocáveis foram determinados segundo procedimentos descritos em Teixeira *et al.* (2017). O fósforo (P) foi extraído com solução Mehlich<sup>-1</sup>, enquanto o potássio (K<sup>+</sup>) e sódio (Na<sup>+</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>) trocáveis foram estipulados pela extração com solução acetato de amônio 1 mol/L<sup>-1</sup>. No caso do K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup>, a quantificação foi feita em fotômetro de chama, já Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> por espectrometria de absorção atômica (EAA). Alumínio (Al<sup>3+</sup>) trocável

foi extraído com solução de KCl (1 mol L<sup>-1</sup>) e determinado por titulação com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,025 mol L<sup>-1</sup>, utilizando azul de bromotimol como indicador. A acidez potencial (H+Al<sup>3+</sup>) foi extraída com acetato de cálcio a pH 7 e quantificada por titulação com solução de NaOH (0,025 mol L<sup>-1</sup>), utilizando fenolftaleína 1% como indicador. Os valores obtidos foram utilizados para o cálculo da Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação em Bases (V%) e Saturação em Alumínio (m%), segundo as equações a seguir:

$$SB = Na+K + Ca^2+Mg^2 \quad \text{Equação 28}$$

$$CTC = Na+K+Ca^2+Mg^2 +(Al^3 + H) \quad \text{Equação 29}$$

$$V\% = \frac{SB*100}{CTC} \quad \text{Equação 30}$$

$$m\% = \frac{100 \times Al^3}{S+Al^3} \quad \text{Equação 31}$$

As análises foram realizadas em todas as amostras dos perfis, em triplicata, e conduzidas no Laboratório de Química para fins de Classificação do Solo do Departamento de Ciência Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP).

#### 4.2.5.1.3 – Carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono

A determinação do COT foi realizada por via úmida, por oxidação do carbono orgânico com dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) e titulação com solução de sulfato-ferro-amoniaco (FeH<sub>2</sub>ON<sub>2</sub>O<sub>14</sub>S<sub>2</sub>) 0,05 mol/L<sup>-1</sup>, segundo o método descrito por Fontana e Campos (2017).

O método consiste em pesar 0,5g de solo peneirado e colocar em erlenmeyer de 250 mL, adicionando 10 mL de solução de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,0667 mol L<sup>-1</sup>. O erlenmeyer foi coberto com um condensador e aquecido em chapa aquecedora (no máximo 150 °C) até a fervura branda por 5 minutos.

Decorrido o tempo, o material foi deixado em repouso para esfriar, para então ser acrescido 80 mL de água destilada, 2 mL de ácido ortofosfórico e três gotas do indicador. Por fim, foi titulado o conteúdo do erlenmeyer com solução de sulfato ferroso amoniaco 0,1 mol L<sup>-1</sup> e anotando o volume gasto.

O conteúdo de carbono orgânico foi obtido pela aplicação do cálculo a seguir:

$$C_{org} = (0,003 * V_d * (40/V_a) * (40/V_b) * 10) / m \quad \text{Equação 32}$$

Onde: Corg corresponde à concentração de carbono orgânico no solo, em g kg<sup>-1</sup>; Vd ao volume total da solução de dicromato de potássio adicionado na digestão da amostra, em mL; Va ao volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação, em mL; Vb ao Volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco aquecido, em mL; m a massa da amostra, em g; o valor 0,003 ao miliequivalente da massa de carbono; e o valor 10 a transformação de % para g kg<sup>-1</sup>.

A determinação do carbono orgânico total foi realizada, em triplicata, em todas as amostras, no Laboratório de Química para fins de Classificação do Solo do Departamento de Ciência Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP).

Além da determinação do conteúdo de carbono, foi calculado o estoque de carbono orgânico. Em termos ambientais, o solo tem importante papel no armazenamento de carbono, pois possui o dobro da capacidade de armazenamento da atmosfera, contribuindo na mitigação do efeito estufa do planeta e consequentemente sobre o aquecimento global. O estoque de carbono orgânico (**Equação 33**) no solo foi calculado a partir da equação de Veldkamp (1994).

$$Est C = \frac{C_{org} * D_s * e}{10} \quad \text{Equação 33}$$

Onde: Est C corresponde ao estoque de carbono orgânico em mg ha<sup>-1</sup>; Corg corresponde à concentração de carbono orgânico no solo, em g kg<sup>-1</sup>; Ds corresponde a densidade aparente do solo em kg dm<sup>-3</sup>; e corresponde à espessura do horizonte em cm.

A determinação do estoque de carbono orgânico total foi realizada para todos os horizontes, nos três perfis considerados, onde foi possível determinar Ds.

#### 4.2.5.2 – Teores totais de chumbo, cádmio e cromo

Uma das marcas ambientais do processo de urbanização é a presença de metais potencialmente tóxicos. Os elementos chumbo (Pb), cádmio (Cd) e cromo (Cr) são metais presentes em resíduos urbanos, sendo que muitas tintas contêm chumbo, baterias e plásticos coloridos contêm cádmio (Cd), enquanto o cromo é amplamente utilizado na fabricação de ligas metálicas e estruturas da construção civil.

Foi determinado o valor total de Pb, Cd e Cr em todos os horizontes. As amostras foram preparadas com digestão usando HNO<sub>3</sub> utilizando forno de micro-ondas, com posterior leitura em Plasma por Acoplamento Indutivo (ICP-AES). O procedimento foi realizado no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), de acordo com Abreu *et al.* (2001), seguindo como referência a EPA - Environmental Protection Agency, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, números 3051 e 6010.

#### **4.2.6 – Separação e análise de microplásticos**

A seguir são apresentados os meios utilizados para obtenção e análise de microplásticos nos solos do Parque Villa-Lobos.

##### **4.2.6.1 – Determinação de microplásticos na fração areia muito grossa e areia grossa**

Os microplásticos são materiais presentes em diversos ecossistemas, porém os estudos sobre as consequências de sua presença no ambiente estão majoritariamente voltados para análise em sedimento marinho, sendo ainda baixo o interesse na compreensão do papel dos microplásticos no processo de estruturação dos solos. Assim, foi realizada a separação e caracterização de microplásticos nos solos estudados dentro da fração areia, permitindo inferir sobre o papel dos microplásticos na agregação do solo.

As frações de areia separadas pela análise granulométrica foram recompostas em uma única amostra por horizonte. Sabendo que os plásticos mais abundantemente possuem densidade de 1,4g cm<sup>-3</sup> (Polietileno tereftalato-PET e Policloreto de vinila-PVC, por exemplo) e 0,8 g cm<sup>-3</sup> (Silicone), a separação de microplásticos da fração mineral do solo ocorreu pelo contato entre os microplásticos e uma solução de densidade superior à 1.4g cm<sup>-3</sup>, como proposto por Löder e Gerdtts (2015). À areia, foi acrescida uma solução saturada de cloreto de zinco (d = 1,7), e foi feita a agitação manual. Os microplásticos que flutuavam foram cuidadosamente recolhidos com o auxílio de uma peneira. Posteriormente, os microplásticos foram acomodados em placas de cerâmica e secos em estufa à 40° por 3 horas. Os microplásticos foram levados à lupa binocular e descritos segundo Hidalgo-Ruz *et al.* (2012) quanto forma (irregular, esférico, alongado), presença de degradação (biológica, fotodegradação, por intemperismo químico, por forças físicas) e cor. Com a finalidade de assegurar a identificação dos microplásticos, todo o material decantado foi observado em lupa. O procedimento de separação de microplástico foi realizado com instrumentos de laboratório de vidro, para evitar a contaminação.



O procedimento foi conduzido no Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da USP.

#### **4.2.6.2 – Micro-espectroscopia $\mu$ -Raman**

A micro-espectroscopia  $\mu$ -Raman (Micro-Raman) permite a obtenção de informações quanto à natureza de uma amostra a partir do espalhamento da radiação eletromagnética após a interação com o material. Um espectrômetro libera um feixe de radiação eletromagnética sobre a amostra (portanto, sem encostar na amostra) e o feixe espalhado pelo material é coletado formando um espectro visível em um gráfico.

Com a finalidade de identificar os microplásticos presentes dentro de agregados dos solos, estruturas dos solos do Villa-Lobos foram separadas de acordo com seu tipo, de modo que em horizontes com associação de estruturas, duas amostras foram obtidas. Cada amostra passou pela análise para determinação do diâmetro médio ponderado via úmida ( $DMP_u$ ), como descrito no item 4.2.4.2, incluindo dispersão e lavagem. Após a determinação do  $DMP_u$ , possíveis microplásticos que ficaram retidos nas peneiras foram separados por flotação utilizando cloreto de zinco e analisados por Micro-Raman. O objetivo foi confirmar a presença de polímeros dentro dos diferentes tipos de agregados de solo. Assim, nem todas as partículas de possíveis microplásticos foram analisadas, mas sim algumas delas.

A análise por Micro-Raman foi realizada no Laboratório de Espectroscopia Molecular, localizado no Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP). Foi utilizado um Micro-Raman Renishaw System 3000.

#### **4.2.6.3 – Micro-espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier**

Na espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (Micro-FTIR) a radiação infravermelha atinge a amostra por uma ponta de diamante, portanto, diferente do  $\mu$ -Raman, no  $\mu$ -FTIR há contato do aparelho com o material. Parte da radiação é absorvida pela amostra enquanto outra parte passa por ela, sendo transmitida até um receptor. O espectro produzido diz respeito a um grupamento químico que compõe a amostra analisa e não o espectro de uma substância, por isso o uso do  $\mu$ -FTIR requer informações prévias do objeto analisado.

Amostras de possíveis microplásticos, obtidas conforme item 4.2.7, mas de dimensões maiores daquelas analisadas por Micro-Raman, foram analisadas por Micro-FTIR para confirmar a presença de polímeros dentro dos diferentes tipos de agregados de solo. A análise por Micro-FTIR foi realizada no Laboratório de Espectroscopia Molecular, localizado no

Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP). Foi utilizado um espectrômetro infravermelho FT-IR modelo Vertex 80v da Bruker que opera na região do medium-IR e far-IR. O equipamento está acoplado a um microscópio Hyperion.

#### **4.2.7 – Análises mineralógicas**

A seguir são apresentados as técnicas empregadas para análise mineralógica dos solos do Parque Villa-Lobos, incluindo a separação e tratamentos na fração argila total e preparação do solo total.

##### **4.2.7.1 – Difratometria de raio-X**

A mineralogia dos argilominerais no solo é considerada um dos fatores influenciadores no processo de formação de agregados. A obtenção de difratogramas permite definir a composição mineralógica dos materiais através da interpretação dos picos existentes. Assim, foi realizada a análise da composição mineralógica de amostras de solo e de argila por meio da técnica de difratometria de raio-X (DRX).

Para a análise mineralógica foram selecionados 8 horizontes (hor. 3, 6 e 9 do perfil 1; hor. 7 e 9 do perfil 2; e os hor. 1, 4 e 9 do perfil 3). A escolha dos citados horizontes ocorreu por apresentarem diversidade tipológica de estruturas e variação nas características químicas e físicas. Cada amostra era composta por cerca de 50 g de solo, previamente preparada na condição de terra fina e quarteada.

A primeira etapa da análise consiste na remoção da matéria orgânica. Para tanto foram utilizadas duas técnicas, uma com a aplicação de NaClO (pH 9,5 ajustado com HCl 0,1 N) - nas amostras com baixo conteúdo de matéria orgânica, e a outra com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30 volumes (9%) - para solos orgânicos. Foram necessárias duas técnicas porque dentre as amostras analisadas há variabilidade do conteúdo de matéria orgânica. Assim, no perfil 1, o hor. 3 apresentou 24 g kg<sup>-1</sup>, o hor.6 apresentou 4 g kg<sup>-1</sup> e o hor.9 apresentou 21 g kg<sup>-1</sup>; no perfil 2, o horizonte 7 apresentou 9 g kg<sup>-1</sup>, o hor.9 apresentou 112 g kg<sup>-1</sup>; no perfil 3, horizonte 3 apresentou 48,5 g kg<sup>-1</sup>, o horizonte 4 apresentou 39 g kg<sup>-1</sup> e o hor.9 apresentou 18,5 g kg<sup>-1</sup>. O sistema brasileiro de classificação de solos considera como solo orgânico aqueles com valor de matéria orgânica acima de 80 g kg<sup>-1</sup>, e por essa razão a amostra do horizonte 9 do perfil 2 foi tratada com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

As amostras dos horizontes 3, 6 e 9 do perfil 1, dos horizontes 7 do perfil 2 e dos horizontes 1, 4 e 9 do perfil 3 foram transferidas para tubos de centrífuga com 50 mL de NaClO pH 9,5 e agitadas manualmente. Após isso, foram levadas para o banho-maria, onde

permaneceram por 15 minutos a 80 °C. Transcorrido o tempo, o material foi centrifugado por 5 minutos em rotação de 1500 rpm e o sobrenadante descartado.

O passo descrito anteriormente foi repetido diversas vezes até que o sobrenadante, de cada amostra, estivesse na mesma coloração da solução de NaClO. Então, por duas vezes, 50 mL de 0,1 N NaCl foram acrescentados ao tubo de centrífuga e rotacionado por 5 minutos a 1500 rpm com descarte do sobrenadante. Para finalização, 25 mL de água destilada foram adicionadas no tubo e o conjunto rotacionado por 10 minutos a 2000 rpm, garantindo apenas a presença de argila suspensa.

A amostra na qual a remoção da matéria orgânica ocorreu com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (hor. 9 do perfil 2) foi colocada em béquer de 1000 ml e umedecida com água deionizada. Então, 5 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30 volumes foi acrescentado causando efervescência na amostra. Cessada a efervescência, mais 5 mL de solução foi acrescentada. O procedimento foi repetido até a ausência de reação entre a amostra e o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, o que demandou 140 ml de peróxido de hidrogênio. Em tubo apropriado, a amostra foi centrifugada com água deionizada e o sobrenadante retirado por sifonamento. O procedimento foi repetido duas vezes, garantindo a retirada de toda a matéria orgânica e dispersão da argila.

Com a remoção da matéria orgânica foi realizado o fracionamento da argila total por decantação. O material do tubo de centrífuga foi transferido para frasco adequado ao agitador horizontal usando Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0,1 g L (pH ~ 8,6), onde foi agitado por 16 horas com 120 agitações por minutos. Transcorrido o tempo, o material foi transferido para peneira de malha 0,053mm para coleta do material fino (silte e argila), enquanto que a fração areia, retida na peneira, foi seca em estufa e acomodada em sacos plásticos identificados.

O material coletado na etapa anterior foi transferido para a proveta de 1L, a qual foi completada com Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0,1 g L (pH ~ 8,6) para coleta da fração argila. Para tanto, a amostra foi agitada por um minuto, usando instrumento próprio m, O material foi coletado após o tempo calculado segundo a lei de Stokes (**Equação 34**), considerando-se partículas < 0,002 mm (limite da argila) na profundidade de 15 cm.

Finalizada a primeira coleta, a proveta foi completada com Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0,1 g L (pH ~ 8,6) e o processo repetido, diversas vezes até a percepção da ausência de argila na proveta. O tempo médio para a coleta após a agitação foi de aproximadamente 9 horas e 30 minutos.

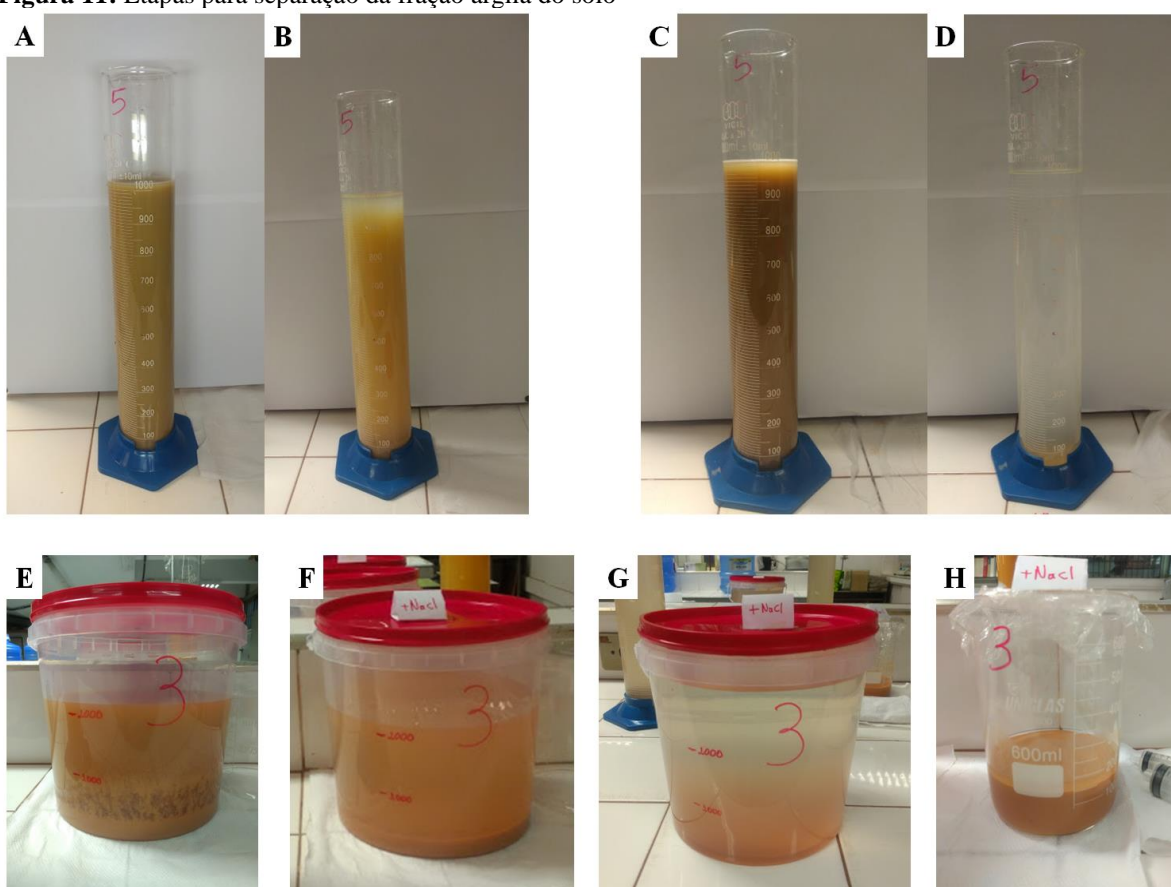
$$V = \frac{h}{t} = \frac{d^2 g (\rho_s - \rho_l)}{18\eta} \quad \text{Equação 34}$$

Onde: V corresponde a velocidade de decantação; h à altura (profundidade) de coleta desejada, em centímetros; t ao tempo necessário para coleta, em segundos; d ao diâmetro da

partícula, em milímetros;  $g$  à aceleração da gravidade;  $\rho_s$  à densidade da partícula;  $\rho_t$  à densidade do solo;  $\eta$  a viscosidade (que varia de acordo com a temperatura).

Todo o material coletado foi acomodado em baldes plásticos com capacidade de 3000 ml. Devido ao enorme volume de material acumulado ao longo do tempo, foi aplicada uma solução salina para flocular a argila. Foi escolhido o uso de 200 ml de solução saturada de cloreto de sódio (NaCl saturado) para floculação sempre que alcançada a marca de 2000 ml de material por balde. Após a floculação e decantação da argila o sobrenadante era retirado por sifonamento e descartado (**Figura 11**).

**Figura 11:** Etapas para separação da fração argila do solo

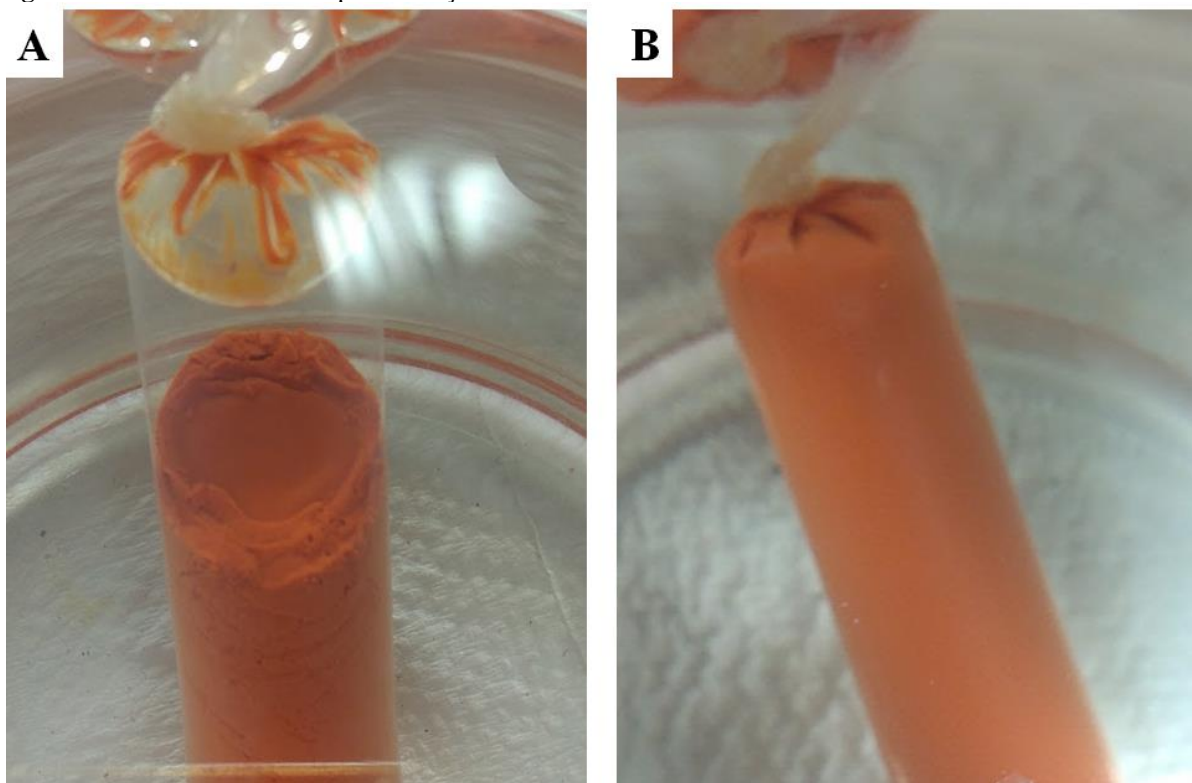


A: amostra do horizonte 9 do perfil 2 após a primeira agitação para coleta de argila; B: mesma amostra que a descrita na A após aproximadamente 9 horas de repouso; C: amostra do horizonte 9 do perfil 2 após a última agitação para coleta de argila; D: mesma amostra que a descrita em C após aproximadamente 9 horas de repouso ; E, F, G: estágios de floculação da argila após adição de NaCl; H: argila floculada transferida dos baldes após retirada do sobrenadante.

Finalizada a coleta da fração argila, as amostras passaram por diálise para retirada do excesso de sais (**Figura 12**). No processo de retirada dos sais, as amostras foram transferidas para sacos de diálise com membrana capaz de permitir a passagem de sais do meio mais concentrado para o meio menos concentrado. Cada amostra foi acomodada em béquer com água

deionizada cuja condutividade elétrica era inferior à  $0,7 \text{ uS cm}^2$ . Duas vezes por dia, com intervalo aproximado de 10 horas, houve a troca da água. O processo foi realizado até que após o intervalo de 10 horas a condutividade elétrica da água em contato com a amostra fosse igual a da água sem amostra ( $0,7 \text{ uS cm}^2$ ).

**Figura 12:** Amostra em diálise para remoção dos sais



A: amostra do horizonte 3 do perfil 1 após as primeiras 10 horas submersas em água deionizada - a presença de feições de agregação indicam a presença de NaCl; B: mesma amostra descrita anteriormente, mas após diversas trocas de água. É evidente a ausência de feições de agregação, indicando baixa concentração ou ausência de NaCl. Elaborado pela autora.

Ao fim da diálise, as amostras foram saturadas com  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$ . Para tanto, cada amostra foi colocada em béquer e agitada para entrar em suspensão, o pH foi ajustado para 3,5 e cerca de 40 mL foi transferido para tubo de centrífuga de 250 mL identificado como “Mg”. O mesmo processo foi repetido em outro tubo, esse identificado como “K”. Com o auxílio de uma proveta, 50 mL de  $\text{MgCl}_2$  foi colocado no tubo identificado como “Mg” e 50 mL de KCl no tubo identificado como “K”. Os tubos foram agitados manualmente e posteriormente centrifugados a 1500 rpm por 5 minutos com posterior descarte do sobrenadante. O processo de centrifugação com acréscimo de solução correspondente foi realizado três vezes. Para finalização do processo, foi feita lavagem das amostras com água deionizada para retirada do cloro presente em  $\text{MgCl}_2$  e em KCl.

Após o procedimento descrito acima, a solução contendo argila de cada amostra ( $Mg^{2+}$  e  $K^+$ ), em estado de floculação e livre de sais, foi transferida para tubo falcon e seca em banho maria até ficar pastosa. Com uma espátula, as amostras foram esfregadas em lâminas em uma direção preferencial, de modo a fornecer orientação. As lâminas contendo argila saturada com Mg e com K foram então encaminhadas para leitura no difratômetro de Raios – X (DRX).

Para solvatar as lâminas de  $Mg^{2+}$  com etileno-glicol, aproximadamente 300 mL da substância pura foi colocado no fundo do dessecador. O dessecador, com a válvula aberta, foi então levado à estufa à  $60^\circ$  por 16 horas. Transcorrido o tempo, o dessecador foi retirado da estufa e sua tampa aberta, cuidadosamente. As lâminas então foram lidas no DRX. A leitura das lâminas de K também foi feita após elas serem colocadas em mufla a  $550^\circ$  por 60 minutos.

Todo o processo de preparação das lâminas foi realizado no Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da USP. A leitura das lâminas ocorreu em Difratômetro de Raio X/D8 Advance DAVINCI equipado com radiação  $Cu K\alpha$  da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP-Diadema). A interpretação dos dados obtidos pelos difratogramas foi feita de acordo com Chen (1977).

#### **4.2.7.2 – Espectrometria de fluorescência de raios X**

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica que, apesar de não demandar um preparo complexo da amostra, pode determinar a composição química dos materiais. Baseia-se na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra.

Considerando 8 horizontes, com diversidade estrutural - horizontes 3 (blocos/laminar), 6 (maciça) e 9 (maciça) do perfil 1; horizontes 7 (maciça) e 9 (maciça) do perfil 2; e horizontes 1 (granular/blocos), 4 (blocos) e 9 (maciça) do perfil 3 - amostras de solo total foram analisadas por FRX para determinação de elementos maiores ( $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $SO_3$ ) e perda ao fogo., houve a análise por FRX apenas na fração argila das amostras de solo dos mesmos 8 horizontes, também para a identificação dos elementos maiores. Para a separação da argila foram empregadas as mesmas etapas descritas no item 4.2.7.1

A preparação das amostras consistiu na secagem em estufa a  $105^\circ C$  por 12 horas e posterior determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI). Para tanto, as amostras foram calcinadas a  $1000^\circ C$  por 5 horas e uma alíquota de 1 grama foi fundida com 9,0 gramas de tetraborato de lítio. As análises foram conduzidas no Centro multiusuário e multi-

institucional do Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Goiás. Foi utilizado um espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh.

#### **4.2.7.3 – Calorimetria diferencial por varredura e Termogravimetria (DSC/TG)**

A calorimetria diferencial por varredura (DSC) é um método calorimétrico no qual são medidas diferenças em energia (entalpias) fornecida a uma substância e a um material-referência, em função da alteração de temperatura. Já a análise termogravimétrica (ATG) se baseia no estudo da variação de massa de uma determinada amostra em função da alteração de temperatura. Essa variação de massa ocorre na transformação física ou química.

Foram analisadas amostras da fração argila dos horizontes 3 (blocos/laminar), 6 (maciça) e 9 (maciça) do perfil 1; dos horizontes 7 (maciça) e 9 (maciça) do perfil 2; e dos horizontes 1 (granulares/blocos), 4 (blocos) e 9 (maciça) do perfil 3. Para a separação da argila foram empregadas as mesmas etapas descritas no item 4.2.7.1. Os horizontes foram os mesmos analisados por DRX e FRX.

A partir dos gráficos gerados após as análises DSC/TG foram calculados os teores de caulinita e gibbsita de acordo com o método de quantificação descrito por Karathanasis e Harris (1994). Para a determinação da porcentagem de caulinita foi considerado o intervalo de 400° a 600° dentro da curva de TG e para gibbsita 250° a 250°.

Para calcular o teor de caulinita e gibbsita na fração argila foram utilizadas as equações 35 e 36, respectivamente (KARATHANASIS e HARRIS,1994).

$$\% C = \frac{P_m}{P_{mcp}} * 1000 \quad \text{Equação 35}$$

$$\% G = \frac{P_m}{P_{mcp}} * 1000 \quad \text{Equação 36}$$

Onde: % C é o teor de caulinita; Pm perda de massa de acordo com a curva do gráfico; Pmcp perda de massa da caulinita pura (140 g kg<sup>-1</sup>) entre o intervalo de temperatura de 400° - 600°; % é o teor de gibbsita; Pmcp perda de massa da gibbsita pura (312 g kg<sup>-1</sup>) entre o intervalo de temperatura de 250° - 250°.

As análises foram conduzidas no Centro multiusuário e multi-institucional do Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Goiás.

Foi utilizado o equipamento Netzsch STA 449 F3 Nevio, com intervalo de temperatura de 30 a 1000 °C, em uma taxa de aquecimento de 20 K/min, com fluxo de oxigênio de 50 mL min.

#### **4.2.7.4 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) integrada a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS)**

A utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite a obtenção de imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Quando o microscópio eletrônico é acoplado a uma sonda de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) é possível a identificação dos elementos químicos presentes na amostra.

A MEV/EDS foi realizada em amostra indeformada de solos, sendo três em formato de torrão e duas em lâmina delgada. Foi considerado um torrão do horizonte 1 do perfil 2, descrito como formado pela associação de estruturas em blocos e em granulares, um torrão do horizonte 1 do perfil 3, descrito como formado pela associação de estruturas em blocos e em granulares, e um torrão do horizonte 4 do perfil 3, descrito como formado por estruturas em blocos.

As duas lâminas delgadas analisadas foram previamente descritas por micromorfologia. Foi considerada uma lâmina de transição do perfil 3 que contempla os horizontes 4, 5 e 6. Estes horizontes foram descritos, respectivamente, como formados por estruturas dos tipos blocos, associação entre blocos e granulares, e blocos. A segunda lâmina selecionada pertence ao horizonte 2 do perfil 3, descrito em campo como formado por estruturas em blocos.

A análise das lâminas considerou não apenas observações morfológicas por MEV. Foi realizado também um mosaico, do topo a base das lâminas, constituído por 2 colunas e 34 linhas, a partir do centro, utilizando imagens com aumento de 28X. Em cada lâmina foram realizados mapeamentos químicos para identificação dos componentes dos solos.

A preparação das amostras incluiu a secagem e o recobrimento com carbono. A preparação e a análise foram realizadas no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Foi utilizado o equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura LEO 440 e Espectrômetro por Energia Dispersiva de Raios X, com detector de estado sólido Si(Li), da marca Oxford.

#### **4.2.8 – Tratamento estatístico**

Utilizando o software R, por meio da interface RStudio (R CORE TEAM, 2022), os dados foram trabalhados por análise descritiva e plotados em diferentes opções gráficas, tais quais, histogramas e gráficos de dispersão para auxiliar na compreensão do comportamento de cada variável. Na análise descritiva, foram consideradas medidas de tendência central (média



aritmética simples, média e moda) e medidas de variabilidade (desvio padrão) para serem identificadas as características predominantes do solo e as discrepâncias (*outliers*). Como descrito no item 4.2.2.1, ao comparar o diâmetro Ferret e a área dos poros, foram realizados três tipos de correlação a fim de criar condições de discussão dos resultados. Para a infiltração os dados foram plotados em gráficos em  $\text{cm h}^{-1}$ , porém em escala de log, enquanto que para condutividade hidráulica não saturada foram utilizados os valores em  $\text{cm h}^{-1}$ , desse modo, ambas as informações puderam dividir o mesmo gráfico.

Foi aplicada a Análise de Componentes Principais (ACP) para a definição das variáveis com maior poder explicativo das características dos solos. Os dados foram tratados como descritos em Wold *et al.* (1897). Assim, além da análise descritiva exploratória dos dados, foi aplicada a análise de correlação de *Spearman*, para avaliar a relação entre variáveis, sendo utilizadas duas variáveis contínuas ou ordinais por vezes, assumindo que elas se alteram conjuntamente, mas não necessariamente com taxa constante (GAUTHIER, 2001). Essa etapa utilizou uma matriz com todos os dados para que eles fossem correlacionados aos pares e recebessem um peso entre 0-1.

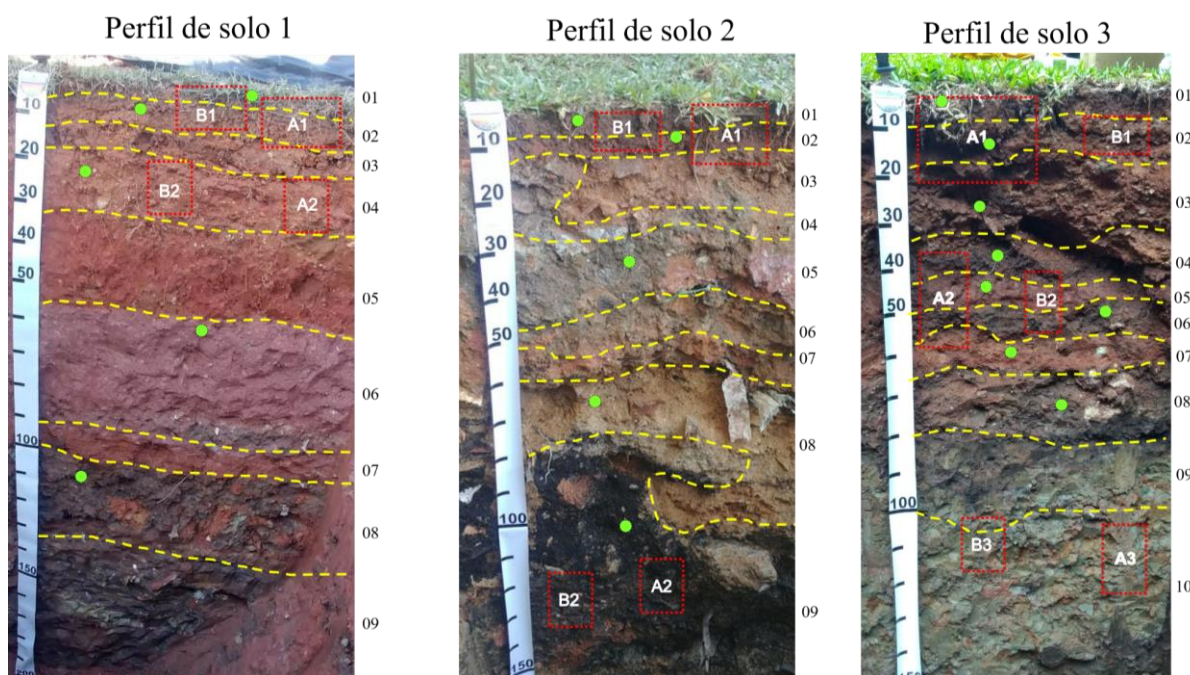
A nova matriz foi testada por Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que avaliou o grau de adequabilidade da aplicação da ACP, considerando valores de 0 a 1. Valores entre 0,5 e 1 indicam que a ACP é apropriada (HAIR *et al.*, 2005). Por fim, a ACP foi executada e, então, foram obtidos os fatores (variáveis) de maiores pesos para caracterizar os solos.

## 5 – Resultados

### 5.1 – Características morfológicas gerais dos solos

Três trincheiras foram abertas e descritas no Parque Villa-Lobos (**Apêndice A**), de modo que cada uma delas foi alocada em um dos diferentes setores de deposição de material antropogênico (**Figura 13**).

**Figura 13:** Os perfis de solo descritos e amostrados



O perfil 1 foi aberto em área de deposição de material orgânico, o perfil 2 em área de deposição de material de construção e o perfil 3 em área de deposição de material de dragagem. Em tracejado amarelo estão os limites entre os horizontes (indicados à direita de cada perfil pelo número correspondente). Os pontos verdes indicam os locais de determinação da infiltração, os retângulos tracejados em vermelhos, as amostragens em blocos. Amostras indicadas pela letra A foram coletadas para análise com MLT e as indicadas pela letra B para confecção de lâminas delgadas. Em todos os horizontes foram coletadas amostras deformadas e nas quais foram identificadas estruturas foram ainda coletadas amostras em torrões para ensaio de densidade, diâmetro médio ponderado seco e úmido. Elaborado pela autora.

No perfil 1, que possui aproximadamente 200 cm de profundidade, foram identificados 9 horizontes com transições predominantes dos tipos claras a abruptas. Trata-se do perfil aberto em local de deposição de material orgânico. Os matizes prevalentes foram entre 2.5YR e 10YR. Houve coloração variegada em algumas áreas do perfil, porém dentro dos matizes citados. Pela coloração percebeu-se que os horizontes 8 e 9 correspondem à deposição de material orgânico, sendo os horizontes acima desses formados pela deposição principalmente de material pré-temperizado, como alterita.

Nos primeiros 12 cm (hor.1 e hor.2), estruturas granulares de tamanhos variados e grau forte foram dominantes, com presença secundária de estruturas em blocos subangulares. No perfil 1, ainda no horizonte 3 (12-16 cm), foi encontrada uma maior quantidade de blocos subangulares pequenos a médios, com grau moderado a forte. Secundariamente, há uma estrutura laminar muito pequena e de grau fraco. Os horizontes subsequentes (hor.4 a hor.9) foram classificados como maciços, sendo que no horizonte 5 (35-54 cm) houve associação com blocos subangulares. Os horizontes com dominância de estrutura em blocos (hor.1 a hor.3) foram classificados como de textura média, enquanto que os horizontes predominantemente maciços (hor.4 a hor.9) como argilosos.

Ainda no perfil 1 foram encontrados, em meio a matriz, sacos plásticos, fragmentos de cerâmica, tecidos e fragmentos rochosos, de tamanhos variados, formando volumes. Não foram localizados horizontes de predomínio de material orgânico em conjunto com estrutura pedogênica. Além disso, convém ressaltar que raízes da cobertura de gramínea foram identificadas ao longo perfil, com maior concentração nos primeiros 4 horizontes (35 cm de profundidade). Devido à presença de fragmentos de cimento de piso observados em campo é possível dizer que de acordo com a WRB, o perfil 1 enquadra-se como sendo um Urbic Technosol (Transportic).

No perfil 2, com cerca de 150 cm de profundidade, foram encontrados 9 horizontes. Principalmente pelos volumes existentes, esse perfil apresentou características de deposição de materiais de construção em todos os horizontes. Diferentemente do perfil anterior, a transição predominante entre os horizontes foi classificada como sendo abrupta. Devido à existência de muitos volumes em meio a matriz, há cores nos matizes 5R, 2.5YR, 5YR, 7.5YR, 10YR e 10YR\_1. Destaca-se um horizonte (hor. 9) escurecido, de cor preta (10YR 2/1).

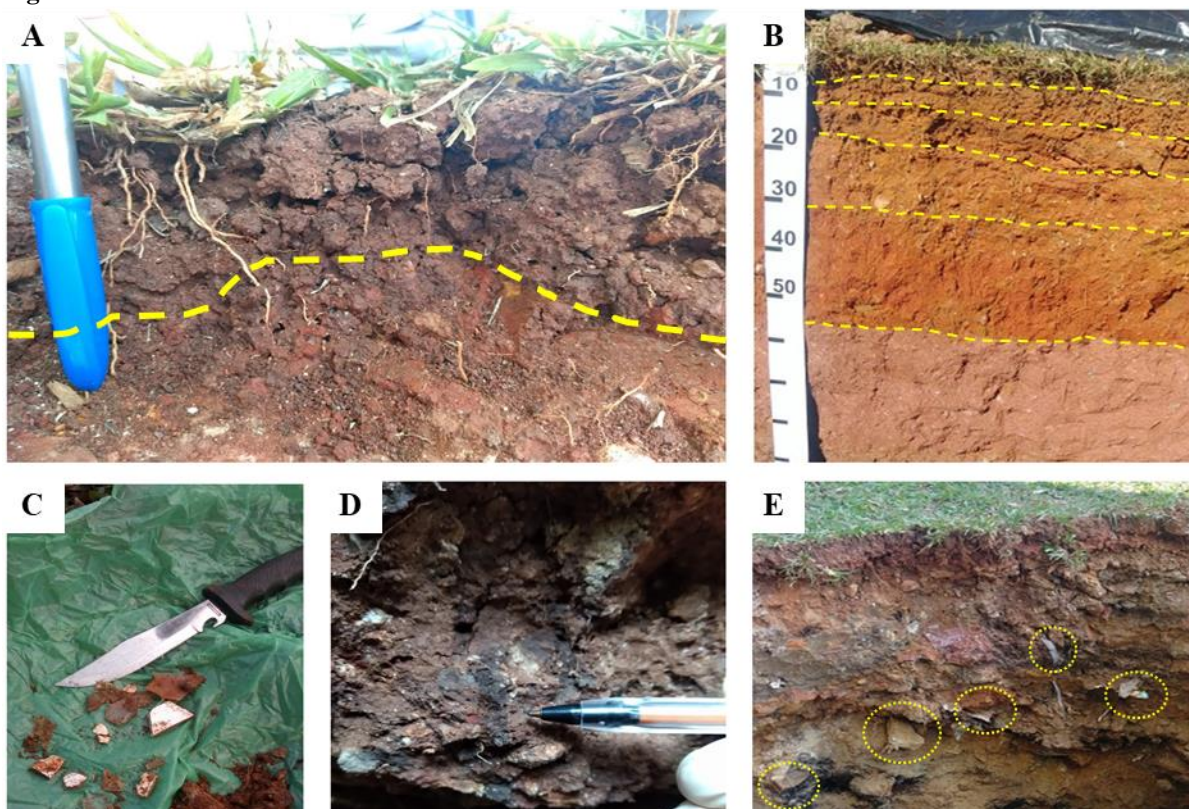
Estruturas granulares de dimensões grandes à muito grandes com matriz argilosa foram encontradas nos primeiros 11 cm do perfil 2 (hor.1 e hor.2), acompanhadas de blocos subangulares médios à muito grandes, também de matriz argilosa. O horizonte 3, que se encontra entre 11 e 21 cm de profundidade, é constituído por grãos soltos. Abaixo dele, há quatro horizontes (hor. 4, hor. 5, hor. 6 e hor. 7) que apresentam características maciças e textura argilosa. No horizonte 8, entre 59 e 72 cm, há novamente material solto, seguido por material maciço de textura argilosa no horizonte subjacente (hor. 9), até a profundidade máxima descrita em campo (150 cm). Dentro da matriz de textura variável entre argilosa e arenosa, diversos volumes foram identificados, representados por materiais de origem antrópica, com destaque para borracha, concreto, plásticos, vidro, metais, tecidos e cerâmicas.

No que diz respeito ao perfil 2, foi possível localizar raízes da cobertura de gramínea, sementes das espécies arbóreas do entorno e algumas minhocas e formigas nos primeiros 10 cm (hor. 1 e hor. 2) de profundidade. Nessa mesma profundidade, foi encontrado material de origem hospitalar. O perfil do solo foi aberto três dias antes da descrição e, embora não tenha sido registrado índice pluviométrico na área, no dia anterior ao trabalho descritivo, o fundo da trincheira continha cerca de 30 cm de água. No entanto, não foram observadas feições hidromórficas nos horizontes. A presença de material antrópico, possivelmente transportados e depositados no local, bem como a existência de horizontes com textura arenosa e outro de coloração escura, permite que o perfil seja classificado de acordo com a WRB como sendo um Hyperskeletal Urbic Technosol (Hyperartefactic, Transportic, Umbric).

O perfil 3, com aproximadamente 160 cm de profundidade, apresenta 10 horizontes com coloração da matriz 2.5YR, 5YR, 7.5YR e 10Y-5GY. Aberto em local de deposição de material de dragagem de rio, o perfil apresentou em seus horizontes 8, 9 e 10, características de ambiente redutor, incluindo coloração no tom de cinza. Acima do horizonte 8, os materiais depositados apresentam aspectos distintos de material de dragagem. Os primeiros 56 centímetros (hor.1, hor.2, hor.3, hor.4, e hor.5) apresentaram material de textura argilosa e estruturas granulares e em blocos subangulares em meio às raízes de gramínea. A partir de 56 cm (hor.6, hor.7, hor.8, hor.9), foi encontrado material de textura argilosa, associado à estrutura maciça. As estruturas granulares observadas nos primeiros 9 cm (hor.1) possuíam dimensões variadas entre grande a muito grande, contudo esse tipo de estrutura não ocorreu nos três horizontes subsequentes (hor.2, hor.3 e hor.4), mas voltou a aparecer no horizonte 5 (45-54 cm), em tamanho médio à grande. Nos horizontes 6 e 8, de característica maciça e textura argilosa, foram encontrados seixos rolados em tamanhos variados.

Outro aspecto importante do perfil 3 foi a forte presença de atividade biológica, principalmente de formigas dentro dos primeiros 10 cm e a existência de um bolsão de material granular dentro no horizonte 3 de predomínio de estrutura subangular, acerca de 20 cm de profundidade (**Figura 14**) e de blocos com feições hidromórficas com mosqueados no horizonte 10. Por fim, em relação ao perfil 3, suas características permitem que ele seja classificado pela WRB como sendo um Technosol, sendo que suas especificidades o colocam como um Reductic, Urbic, Spolic Technosol (Transportic).

**Figura 14:** Características dos solos estudados



Características dos perfis encontradas. A: presença de estrutura granular associada a presença de raízes e a mudança para estrutura em blocos no horizonte subjacente no perfil 3; B: transição abrupta no perfil 1; C e E: materiais antrópicos encontrados em abundância no perfil 2, como plástico, madeira, metal e concreto; D: canais preenchidos com material escuro no perfil 3. Elaborado pela autora.

## 5.2 – Caracterização morfológica das estruturas pedogenéticas

Como citado, as descrições morfológicas dos três perfis permitiram a observação de diferentes tipos de estruturas pedogenéticas com diferentes tamanhos e graus de desenvolvimentos (**Tabela 7**), mas que compartilham algumas características, como a presença de raízes (**Figura 15**).

No perfil 1, as estruturas identificadas variaram de tamanhos muito pequenos a grandes. Nos horizontes 1 e 2, desse perfil, o grau de desenvolvimento predominante foi forte, enquanto que nos horizontes 3 e 4 o grau foi moderado. A descrição em campo demonstrou que estruturas granulares, no perfil 1, correspondem sempre a grau de desenvolvimento forte. No perfil 2, onde apenas os dois primeiros horizontes apresentaram estruturas, percebe-se a presença de estruturas variando de pequenas a muito grandes, como predomínio de grau de desenvolvimento moderado. Já no perfil 3, as estruturas variaram entre muito pequenas a muito grandes; Nesse perfil, diferente dos demais perfis, o horizonte 1 não apresentou estruturas com grau de desenvolvimento forte. Blocos com grau de desenvolvimento forte foram descritos nos



horizontes 2, 3, 4 e 6. Estruturas do tipo granular, apresentou grau forte apenas no horizonte 5, onde ocorreu em associação com blocos de grau moderado.

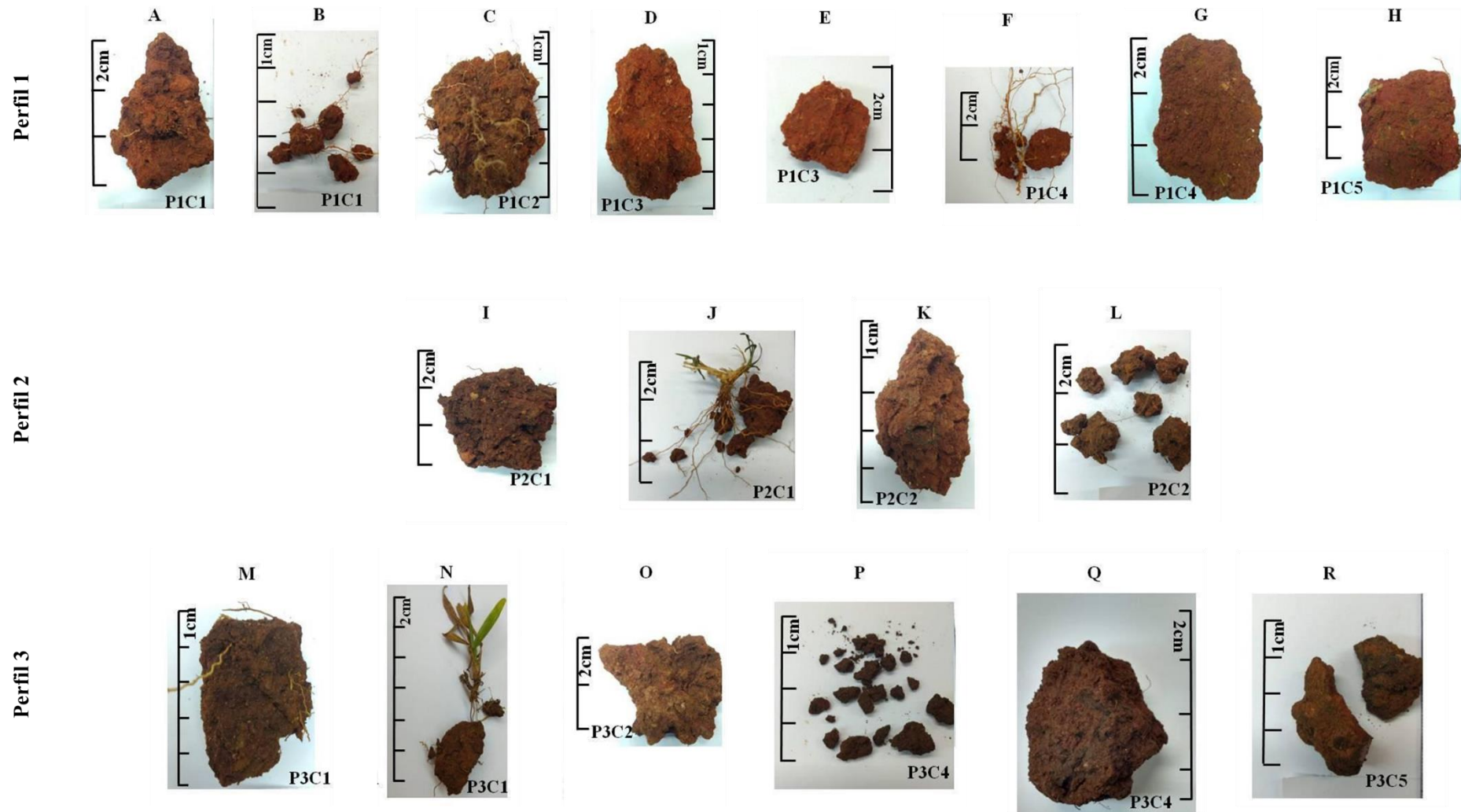
**Tabela 7:** Características das estruturas identificadas

<b>Perfil</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Estruturas</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Grau de desenvolvimento</b>
1	1	Granulares	Muito pequenos a grandes	Forte
		Blocos	Pequenos	Forte
	2	Granulares	Muito pequenos a grandes	Forte
		Blocos	Pequenos a médio	Forte
	3	Blocos	Pequenos a médio	Moderado
		Laminar	Muito pequenos a pequenos	Moderado
	4	Maciça	-	-
	5	Blocos	Pequenos a médio	Moderado
		Maciça	-	-
	6	Maciça	-	-
	7	Maciça	-	-
8	Maciça	-	-	
9	Maciça	-	-	
2	1	Granulares	Grandes a muito grandes	Forte
		Blocos	Muito grandes	Moderado a forte
	2	Granulares	Pequenos a médios	Moderado
		Blocos	Médios a muito grandes	Moderado
	3	Grãos soltos	-	-
	4	Maciça	-	-
	5	Maciça	-	-
	6	Maciça	-	-
	7	Maciça	-	-
	8	Grãos soltos	-	-
9	Maciça	-	-	
3	1	Granulares	Grandes a muito grandes	Moderado
		Blocos	Pequenas a muito grandes	Moderado
	2	Blocos	Pequenas a muito grandes	Forte
	3	Blocos	Pequenas a muito grandes	Forte
	4	Blocos	Muito pequenas a pequenas	Forte
	5	Granulares	Médios	Forte
		Blocos	Médios a grandes	Moderado
	6	Blocos	Muito pequenas a pequenas	Forte
	7	Maciça	-	-
	8	Maciça	-	-
	9	Maciça	-	-
10	Blocos	Grandes	Moderado	

Elaborado pela autora.

Nos horizontes superficiais essas estruturas eram mais escuras do que nos horizontes subsuperficiais, mesmo considerando estruturas do mesmo tipo, como as estruturas em blocos. Em relação aos blocos subangulares, eles foram identificados, como já descrito, em todos os perfis (**Figuras 15A, 15C, 15D, 15G, 15H, 15I, 15K, 15M, 15O, 15Q e 15R**), mais especificamente nos primeiros 5 horizontes do perfil 1, nos 2 primeiros horizontes do perfil 2, nos 5 primeiros horizontes do perfil 3, assim como no décimo horizonte do perfil 3.

Figura 15: Estruturas observadas em campo



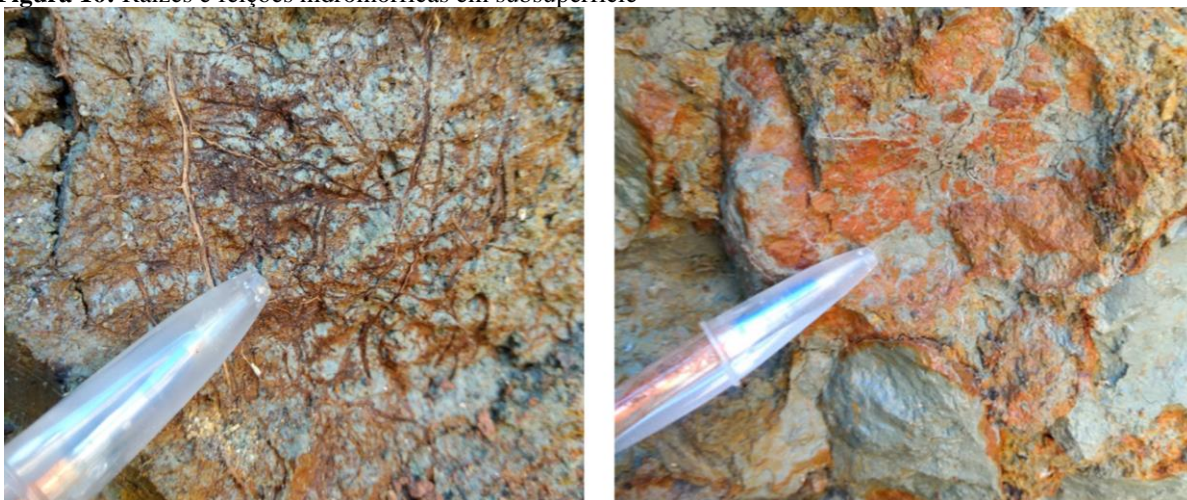
Exemplos das diferentes estruturas encontradas em campo, distintas entre si não apenas pelo tipo (granulares e em blocos), mas também pelo tamanho (pequenas à grandes). Elaborado pela autora.

As estruturas granulares (**Figuras 15B, 15F, 15J, 15L, 15N e 15P**) estavam presentes nos dois primeiros horizontes do perfil 1, bem como nos dois primeiros horizontes do perfil 2 e no primeiro e quarto horizonte do perfil 3. A estrutura laminar (**Figura 15E**), foi encontrada no terceiro horizonte do perfil 1. Além disso, foi identificada a característica maciça nos horizontes 4, 5, 6, 7, 8 e 9 do perfil 1, nos horizontes 4, 5, 6, 7 e 9 do perfil 2 e nos horizontes 7, 8 e 9 do perfil 3. Grãos soltos foram descritos no perfil 2, em seus horizontes 3 e 8, sendo que no caso do oitavo horizonte o material estava entre dois horizontes de característica maciça.

A presença de estrutura do tipo granular está associada sempre com a presença de raízes finas, ou seja, entre 1 e 2 mm. Quanto aos tamanhos das estruturas granulares, elas variaram entre muito pequenas, ou seja, menor do que 1 mm, até estruturas grandes, tamanho que corresponde à dimensão entre 5 e 10 mm. Do mesmo modo que as estruturas granulares, a presença de blocos subangulares também foi associada à presença de raízes, porém em menor quantidade. As raízes nas estruturas subangulares variaram entre muito pequenas e médias, classes que representam as raízes menores que 10 mm. Raízes também foram notadas nas amostras de estruturas laminares atravessando-as no sentido vertical.

Além das raízes encontradas dentro das estruturas, as quais são pertencentes à cobertura de gramínea do parque, foi observada no horizonte 10 do perfil 3, a existência de raízes sem associação com a vegetação de gramínea presente na superfície do perfil (**Figura 16**).

**Figura 16:** Raízes e feições hidromórficas em subsuperfície



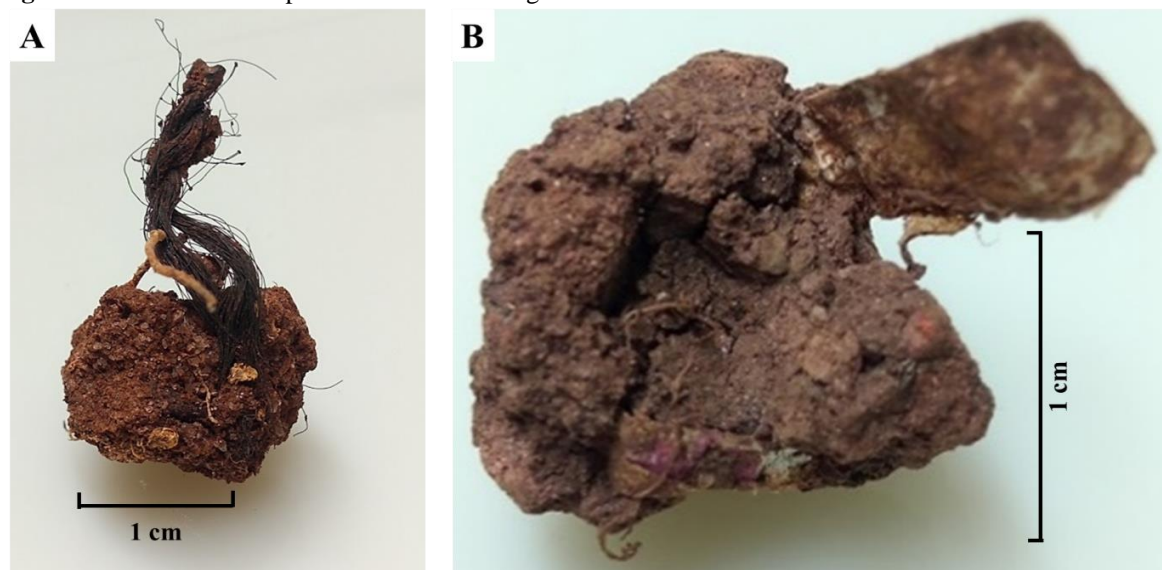
A figura apresenta exemplos das raízes facilmente encontradas no horizonte 10 do perfil 3, não relacionadas com as gramíneas da superfície, bem como as feições de oxirredução desse mesmo horizonte. Elaborado pela autora.

Preenchimentos de material escuro dentro da matriz foram observados com frequência nas estruturas em blocos. Tais preenchimentos foram encontrados em blocos do perfil 3 a 45 cm de profundidade, o que corresponde ao horizonte 4 (**Figura 15Q**). Em alguns casos, foi



verificada a presença de material antrópico envolto pela matriz do solo, formando blocos subangulares (**Figura 17**). Com relação a matriz das estruturas granulares do perfil 1, foi identificada textura média, assim como os blocos, enquanto que horizontes de característica maciça eram argilosa. Nos perfis 2 e 3 estruturas granulares, em blocos e horizontes maciços apresentaram textura argilosa e os horizontes de grãos soltos, exclusivos do perfil 2, textura arenosa.

**Figura 17:** Materiais antrópicos em blocos subangulares



A figura mostra dois exemplos de blocos formados em associação com material antrópico. A: Agregado formado ao redor de linha de costura no horizonte 1 do perfil 3; B: Agregado formado ao redor de fragmento plástico no horizonte 4 do perfil 3. Elaborado pela autora.

### 5.3 – Escaneamento por “Multi-stripe laser triangulation (MLT)”

O escaneamento da superfície dos perfis (**Apêndice B**), permite observar, em preto, o sistema poroso dos solos (**Figura 18**), bem como a presença de algumas estruturas, reforçando as informações obtidas em campo. Assim, no perfil 1 foi coletada uma amostra com a presença de estruturas descritas em campo como uma associação entre os tipos granulares e em blocos (hor.1 e hor.2) e outra de horizonte maciço (hor.4). O perfil 2 foi amostrado onde houve associação entre estruturas granulares e em blocos (hor.1 e hor.2), onde foi descrito o aspecto de grãos soltos (hor.3), e em horizonte descrito como maciço (hor.9). Já o perfil 3 foi amostrado onde foi identificada a associação entre estruturas granulares e em blocos (hor.1, hor.2), mas também em uma seção do perfil que permitiu a amostragem dos horizontes subsequentes formados exclusivamente por estruturas em blocos (hor.3, hor.4, hor.6) concomitante a horizonte de associação entre estruturas granulares e blocos (hor.5). Ainda no perfil 3 foi amostrado o horizonte formado por blocos (hor.10)

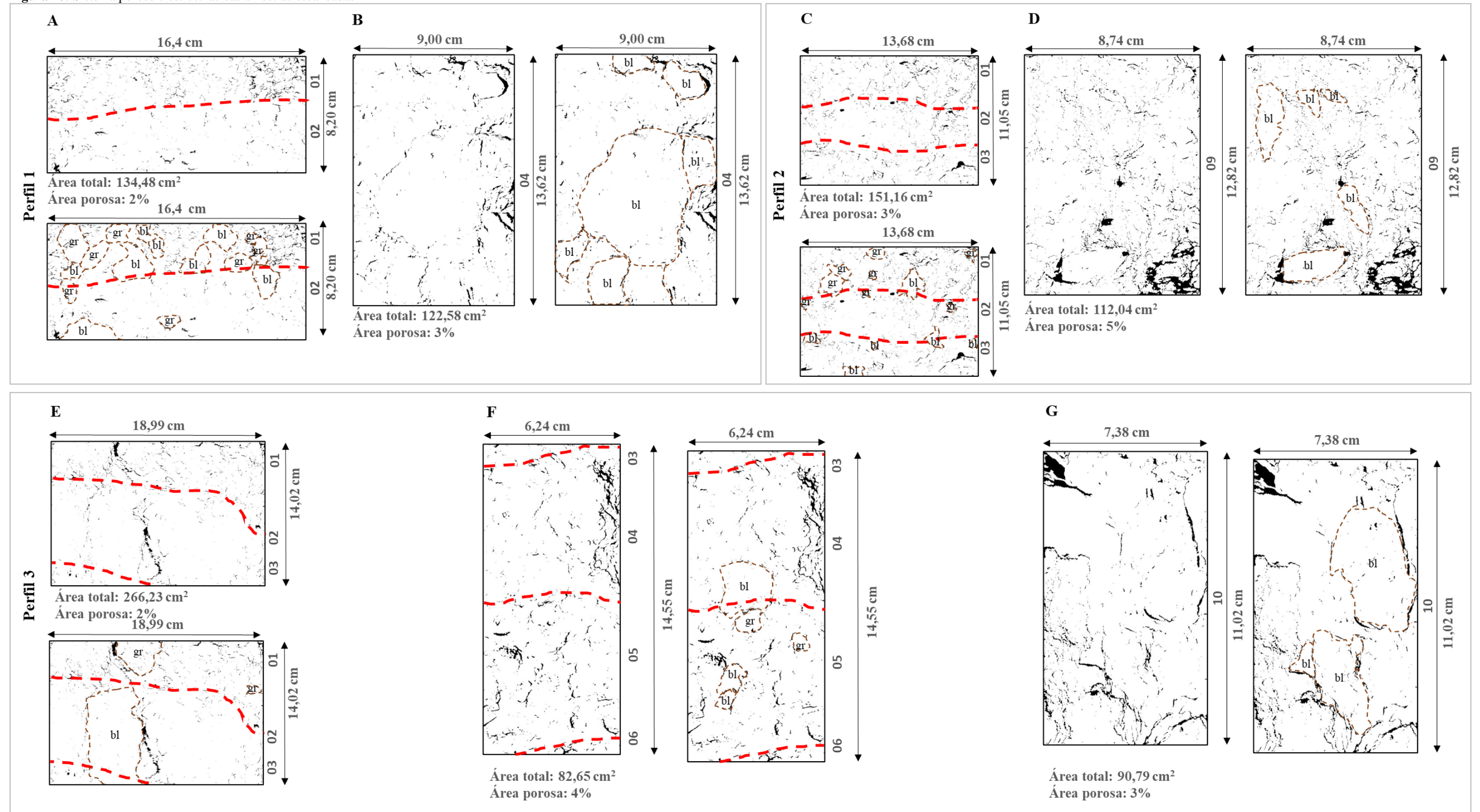
Considerando o perfil 1, a imagem (**Fig. 18A**) mostra que dentro dos primeiros 8 cm (hor.1 e hor.2) há clara distinção entre os dois primeiros horizontes devido à grande variação no sistema poroso. No primeiro horizonte do perfil 1 o sistema poroso é muito mais proeminente do que no horizonte 2, o qual possui visivelmente menos poros do que o horizonte 4 (**Fig. 18B**). Observa-se no horizonte 1 maior presença de estruturas em relação ao horizonte 2. No caso do horizonte 1 as estruturas apresentaram pela imagem grau moderado, enquanto no horizonte 2, grau fraco. Curiosamente, o horizonte 4 do perfil 1, que em campo foi descrito como maciço, ao ser analisado pelo MLT permitiu a identificação de algumas estruturas em grau moderado.

No perfil 2, o horizonte 1 (0-5,5 cm) também apresenta mais poros que os horizontes subjacentes, principalmente o 2 (5,5-11 cm), mas a variação na quantidade de poros é menor do que no perfil 1. Considerando as duas imagens referentes ao perfil 2, fica claro que entre o primeiro e o segundo horizonte há ligação entre os poros. Aparentemente, existem no horizonte 2 do perfil 2 alguns poros de aspectos circulares, o que não ocorre no horizonte superior. O sistema poroso apresenta boa conectividade, mesmo dentro de horizontes de matriz maciça, como no caso do horizonte 9 (72-150 cm) representado na figura pela letra D. Na imagem do horizonte 1 do perfil 2 foram identificadas estruturas de grau moderado. Já em seu horizonte 2 as estruturas delimitadas a partir do MLT possuem grau fraco. Estruturas de grau fraco também foram identificadas nas imagens dos horizontes 3 e 9, descritos em campo respectivamente como formado por grãos soltos e material maciço.

No perfil 3 ficou evidente a existência de um sistema poroso mais expressivo no primeiro horizonte (0-9 cm) em relação ao segundo (9-17 cm). Porém, de acordo com as imagens E e F da **Figura 18**, é notório que certos poros alcançam o segundo e terceiro horizonte. Na imagem F também é possível notar que parte do sistema poroso iniciado no horizonte 3 (17-36,5) corta os horizontes subsequentes 4, 5 e 6 (profundidade entre 36,5-65 cm). Percebe-se que em todos os horizontes analisados pelo MLT, no perfil 3, possuem estruturas em grau fraco, incluindo estruturas que ocasionam canais entre horizontes (**Fig. 18E e F**)

Tomando a porcentagem de poros em relação à área total de cada amostra, é evidente que em todos os perfis, as amostras coletadas em maiores profundidades são as mais porosas. No perfil 1, a amostra de 0-11 cm apresentou 2% de porosidade, enquanto que a amostra coletada entre 17-35 cm 3%. No perfil 2, entre 0-16 cm, o sistema poroso compreende 3% da área total, enquanto entre 110-124 cm 5%. Já no perfil 3, entre 0-18 cm, os poros correspondem a 2% da área superficial da amostra, enquanto que entre 35-53 cm 3% e na profundidade de 94-108 cm 4%.

Figura 18: Sistema poroso e estruturas das amostras escaneadas

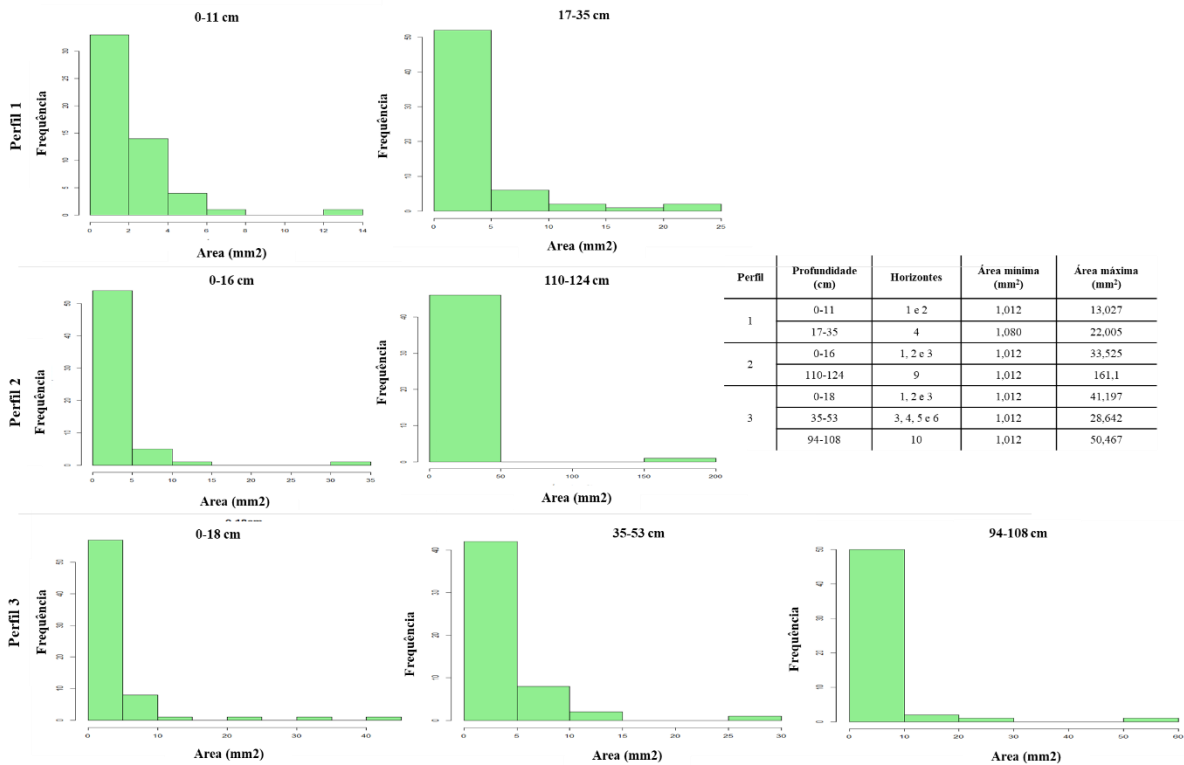


Observação do arranjo poroso, em preto, nas amostras; as formas laranja indicam estruturas identificadas; as linhas vermelhas representam as divisões entre os horizontes, identificados pelos números em verde ao lado direito de cada imagem; gr estrutura granular; bl estrutura em bloco. Elaborado pela autora

Para cada amostra, foram extraídas informações sobre a área, diâmetro Ferret, angulação e circularidade de cada poro. Histogramas foram utilizados para identificar a área predominante de poros para cada amostra e foram extraídas informações sobre a área mínima e máxima dos poros de cada amostra (**Figura 19**).

No caso do perfil 1 ocorre, nos primeiros 11 cm, predomínio de poros até 2 mm<sup>2</sup>, enquanto que em profundidade há aumento da quantidade de poros até 5 mm<sup>2</sup>. No perfil 2, o predomínio de poros nos primeiros 16 cm foi de 5 mm<sup>2</sup>, e entre 110-124 cm ficou evidente a presença de poros bem maiores incluindo poro de 161 mm<sup>2</sup>. Já no perfil 3, assim como no perfil 2, os primeiros centímetros do perfil apresentaram predomínio de poros de até 5 cm<sup>2</sup>, o que também ocorre entre 35-53 cm. Já entre 94-108 cm nota-se aumento das classes dos poros com até 10 mm<sup>2</sup>.

**Figura 19:** Frequência da área dos poros identificados



A figura indica a frequência da área de poros. Elaborado pela autora.

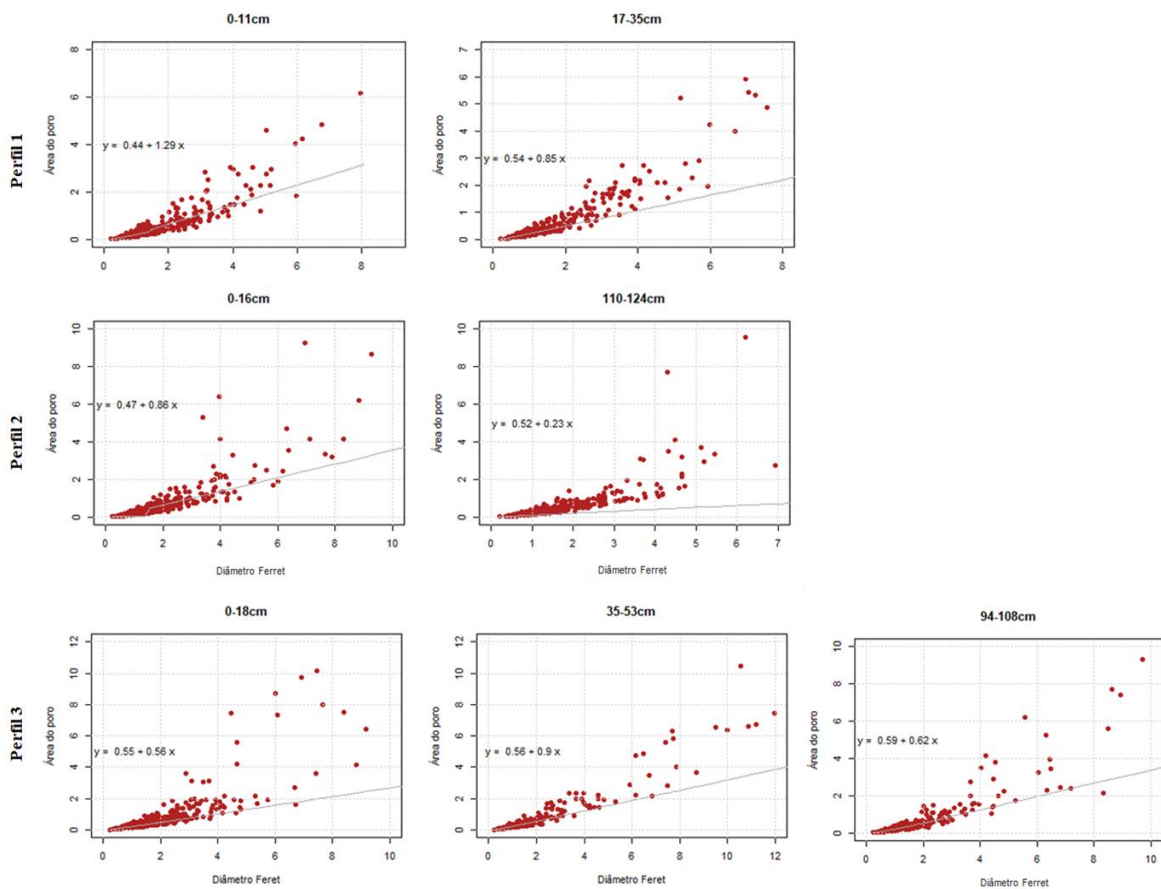
Os poros de área máxima coincidem com os poros de máximo diâmetro Ferret em 5 das 7 amostras estudadas. Essa alta correlação é expressa pelos altos valores dos índices Pearson (**Tabela 8**), do que significa a existência de poros alongados. Entretanto, os valores plotados em gráfico de dispersão (**Figura 20**) mostram que o diâmetro Ferret e a área do poro deixam de possuir comportamento linear. Essa tendência ocorre à medida que a área do poro aumenta.

**Tabela 8:** Correlação entre diâmetro Ferret e área dos poros

Perfil	Profundidade (cm)	Índice de correlação Pearson entre diâmetro Ferret e área	Área máxima	Diâmetro Ferret	É o mesmo poro?
1	0-11	0,83	13,027	8,050	Sim
	17-35	0,88	22,005	16,709	Não
2	0-16	0,80	33,525	20,125	Sim
	110-124	0,79	161,100	31,531	Sim
3	0-18	0,75	41,197	15,168	Sim
	35-53	0,82	28,642	14,439	Sim
	94-108	0,76	50,467	22,917	Não

Elaborado pela autora.

**Figura 20:** Relação entre área do poro e o diâmetro Ferret



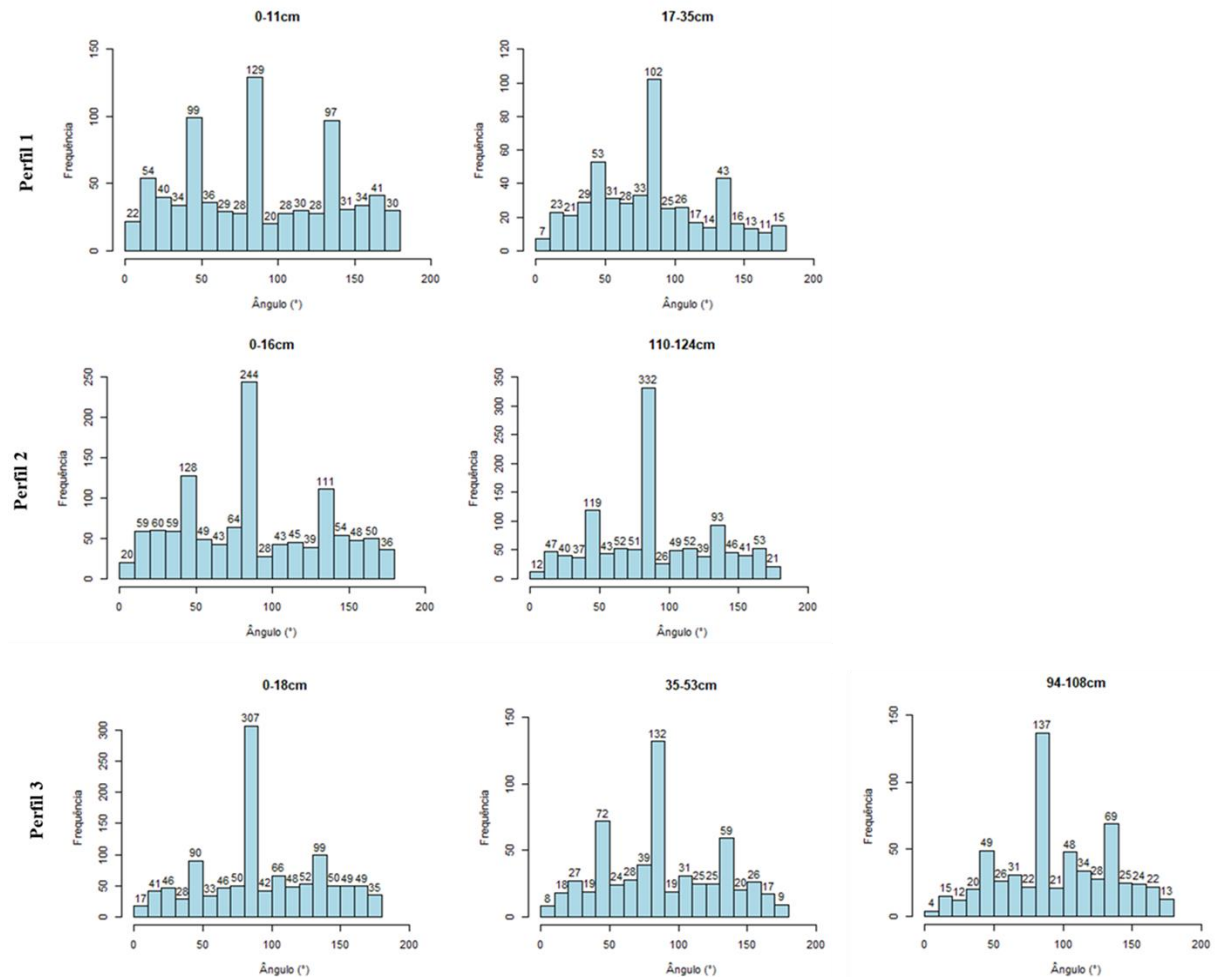
A figura indica que o diâmetro Ferret e a área do poro têm menor correlação quanto maior é a área do poro. Elaborado pela autora.

A tendência indicada pelo gráfico é que o diâmetro Ferret e a área do poro deixam de possuir comportamento linear na medida em que a área do poro aumenta. A respeito da angulosidade dos poros, foram encontrados valores variados (**Figura 21**), mas a maior frequência indica predomínio de ângulo de 90°, seguido dos ângulos de 40° e 140° para todas as amostras. Entretanto, o sentido vertical não é a dominância absoluta dentro das amostras, pois a soma dos poros em outras angulações excede o número de poros à 90°. Os dados



demonstram que o número de poros no sentido horizontal, ou seja, com ângulo de 180° e 0° é baixo em todas as amostras. Assim, fica evidente que os poros das amostras são orientados em direção vertical e diagonal em diferentes ângulos.

**Figura 21:** Angulosidade dos poros

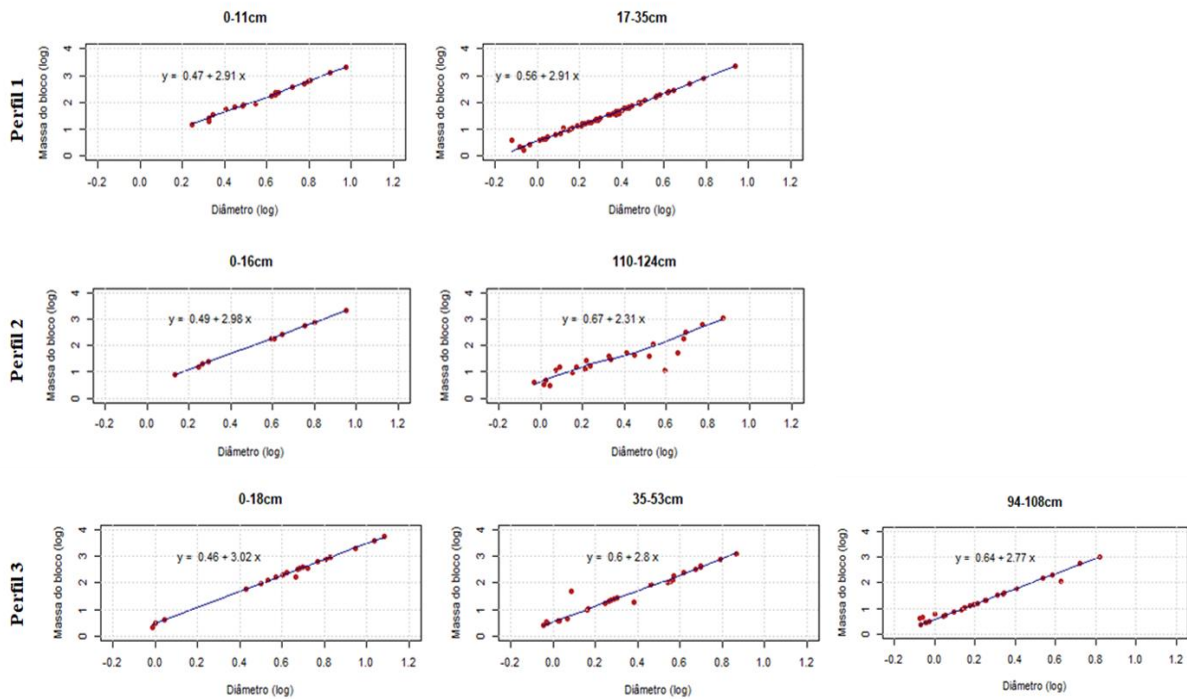


Frequência da angulosidade dos poros com claro destaque para os poros com ângulo acima de 90°. Elaborado pela autora.

O escaneamento rotacional dos blocos em diferentes níveis indicou a existência de uma relação linear entre o diâmetro do bloco e sua massa (**Figura 22**). Os valores da dimensão fractal, 2,5 nas duas amostras do perfil 1, indicam que tanto entre 0-11 cm (hor.1 e hor.2) como entre 17-35 cm (hor.4), compostos por blocos e estruturas granulares de textura argilosa, apresentaram relação entre diâmetro e a massa, ou seja, comportamento fractal, com o valor ideal indicado por Hirmas *et al.* (2013). Ao quebrar os blocos observa-se que a massa dos blocos menores e o diâmetro desses blocos mantém uma relação de linearidade.

Nos perfis 2 e 3 também foram encontrados valores próximos aos do perfil 1. No caso do perfil 2, a primeira amostra (0-16 cm), que representa os três primeiros horizontes do perfil, apresenta valor de dimensão fractal de 2,5. No perfil 2, a amostra coletada na profundidade de (110-124 cm), correspondente ao horizonte 9, de textura argilosa e característica maciça, apresentou dimensão fractal de 2,6.

**Figura 22:** Relação entre massa e diâmetro do agregado



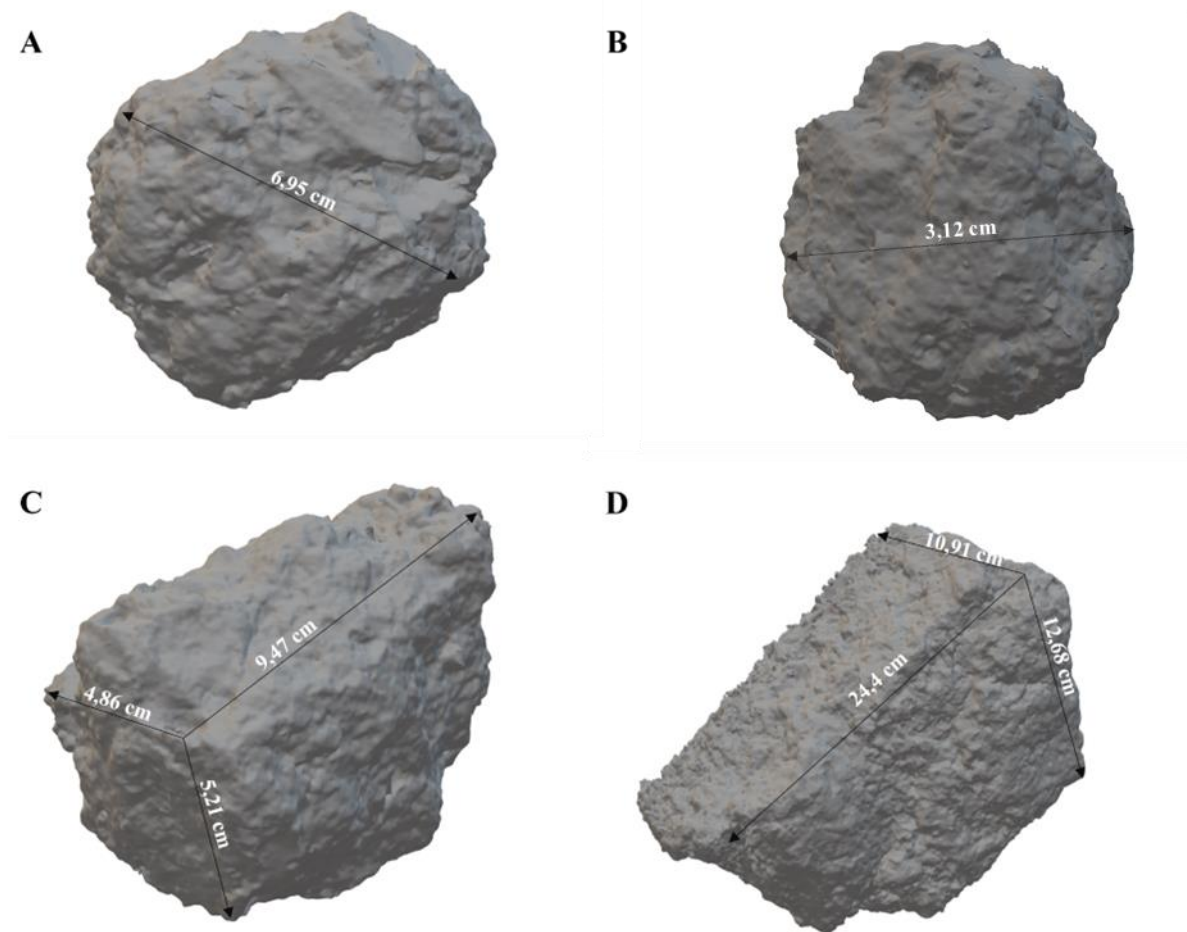
Relação entre Massa dos agregados com o volume desses agregados. Elaborado pela autora.

O perfil 3 apresentou tendência similar aos perfis anteriormente descritos, ou seja, valor de 2,5. A amostra mais superficial do perfil 3 (0-11,05 cm), corresponde aos horizontes 1 e 2, ambos com a presença de blocos subangulares e textura argilosa. A segunda amostra (35-53 cm), correspondente aos horizontes 4 e 5, ambos descritos como de estruturas em blocos, também apresentou dimensão fractal de 2,5. A terceira amostra do perfil 3 (94-108 cm) correspondente apenas ao horizonte 10, de estrutura em blocos e textura argilosa, a dimensão fractal também foi de 2,5 assim como todas as demais amostras do perfil.

O escaneamento das amostras permitiu a obtenção de imagens de blocos e estruturas granulares (**Figura 23**) em diferentes níveis de detalhes. Respeitando as linhas de fraquezas das amostras, foi possível individualizar blocos e estruturas granulares de diferentes dimensões.

São os mesmo tipos de estruturas identificadas em campo, que também apresentaram variadas dimensões. Nas superfícies desses agregados é possível observar suas rugosidades, com as quais os fluidos interagem no processo de condutividade hidráulica.

**Figura 23:** Exemplos de amostras escaneadas com MLT



A e B: agregados de solo, coletados no horizonte 1 do perfil 3, em forma de grumo, em diferentes tamanhos; C: agregado em bloco do horizonte 1 do perfil 2; D: agregado em bloco do horizonte 1 do perfil 3.

#### 5.4 – Análises micromorfológicas

Após coletadas, as amostras foram preparadas conforme o item 4.2.3, mas houve a perda de uma amostra (B3 do perfil 3) durante o processo de impregnação. De acordo com os técnicos responsáveis pelo processo, houve a expansão do solo e criação de rachaduras que inviabilizaram a preparação das lâminas. A micromorfologia revelou a existência de microestruturas e feições pedológicas (**Apêndice C**).

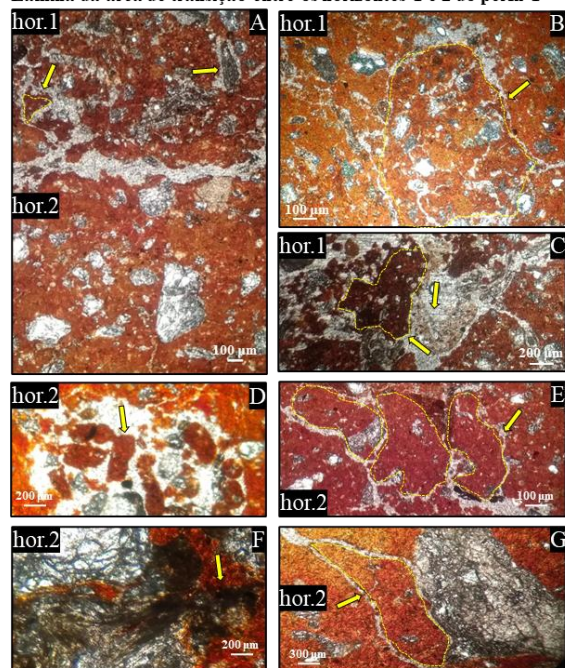
Na **Figura 24** é possível observar as características micromorfológicas de três horizontes do perfil 1. O horizonte 1, descrito em campo como formado pela associação entre grumos e blocos apresentou distribuição porfírica (**Figura 24 A e B**) entre os constituintes e



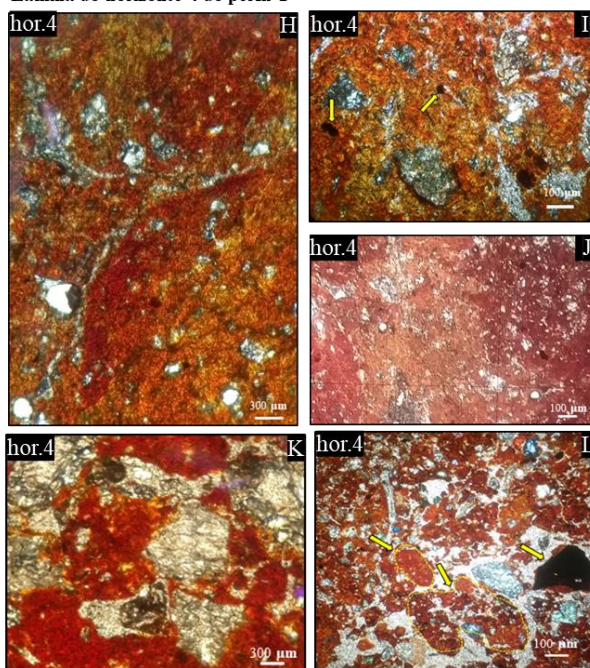
sistema poroso constituído por canais e fissuras (**Figuras 24 A, B, C**). É também perceptível a existência de *peds* em grumos e blocos de tamanhos variados no horizonte 1 (**Figuras 24 A, B, C**). Em relação ao horizonte 2 do perfil 1, percebe-se existência de distribuição porfírica (**Figuras 24 E e G**), a presença de microestruturas em blocos, com feições podem indicar transformação de grumos em blocos (**Figura 24 E**), pois, nota-se porções muito arredondadas em algumas faces de certos blocos.

**Figura 24:** Micromorfologia do perfil 1

Lâmina da área de transição entre os horizontes 1 e 2 do perfil 1



Lâmina do horizonte 4 do perfil 1



A microagregado em bloco e presença de raízes no horizonte 1; B microagregado em grumo no horizonte 1; C microagregado em bloco no horizonte 1 delimitado por um sistema poroso constituído por canais e fissuras; D excrementos no horizonte 2; E microagregados em blocos no horizonte 2; F raízes no horizonte 2; G microagregado em bloco ao lado de grão de quartzo no horizonte 2; H aspecto maciço no horizonte 4; I nódulos escuros em matriz argilosa no horizonte 4; J aspecto maciço; K presença de quartzo e matriz argilosa no horizonte 4; L microagregados em blocos e presença de material opaco no horizonte 4.

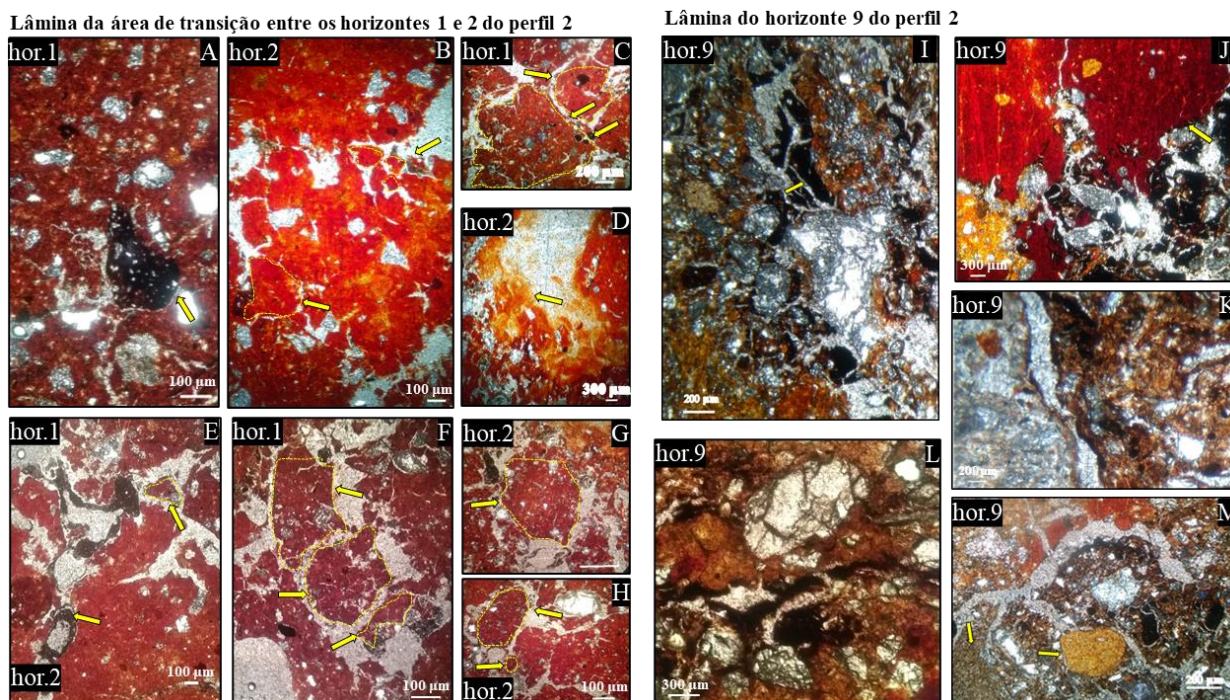
Além disso, no perfil 2 foi encontrada a presença de excrementos (**Figura 24 D**) e de raízes em estado de decomposição (**Figura 24 F**). Em relação ao horizonte 4, descrito em campo como maciço, foi identificada distribuição porfírica entre os constituintes, e foi comprovado predomínio de ausência de *peds* em microescala (**Figura 24 H e J**), porém foram encontradas zonas de formação de blocos (**Figuras 24 L**). Foi descrita a presença de nódulos opacos no horizonte 4 (**Figura 24 I**).

Nos 3 horizontes analisados no perfil 1, fração grossa do solo é constituída principalmente por quartzo subangulares (**Figuras 24 A, E e K**). As lâminas permitiram identificar em microescala a presença de raízes, principalmente nos horizontes 1 e 2 (**Figura**

24 A, C e F). Ainda em relação ao perfil 1, o sistema poroso observado nos horizontes 1 e 2 (**Figura 24 A**) demonstra que pode estar ocorrendo fluxo interno entre os horizontes, fato que não foi apontado pela análise de imagem via MLT, a qual, vale reforçar, fornece informações sobre a macroporosidade do solo. Nota-se que no horizonte 4, apesar de identificados blocos nas lâminas delgadas, não foram identificados blocos ou qualquer outro tipo de *ped* em escala macro via MLT corroborando com a hipótese do trabalho de que há a ocorrência de estruturação do solo em estágio inicial.

No perfil 2 (**Figura 25**) a variabilidade morfológica descrita no campo refletiu em variabilidade micromorfológica nas lâminas. De modo geral é possível observar blocos subangulares muito bem desenvolvidos nos horizontes 1 e 2 (**Figuras 25 B, C, E, F, G e H**) o que ocasiona a formação de um sistema poroso bem definido, capaz de afetar positivamente a condutividade hidráulica nos primeiros 11 cm que correspondem a esses horizontes.

**Figura 25:** Micromorfologia do perfil 2



A nódulo salpicado no horizonte 1; B microagregados em blocos no horizonte 2; C microagregado com nódulo opaco no horizonte 1; D material argiloso migrando para o poro no horizonte 2; E microagregado e presença de material escuro no sistema poroso no horizonte 1; F microagregado em bloco e em grumo no horizonte 1; G microagregado em grumo no horizonte 2; H microagregados no horizonte 2.

Em relação aos horizontes 1 e 2 do perfil 2, formados por grumos e blocos em escala macro, estes foram definidos em nível microscópico como de distribuição porfírica (**Figuras 25 A e B**), com predomínio de quartzo subangular (**Figuras 25 A, G e H**) e nódulos opacos (**Figuras 25 A, C e F**) na fração grossa, e argila rica em óxidos, na fração fina. No horizonte 1,

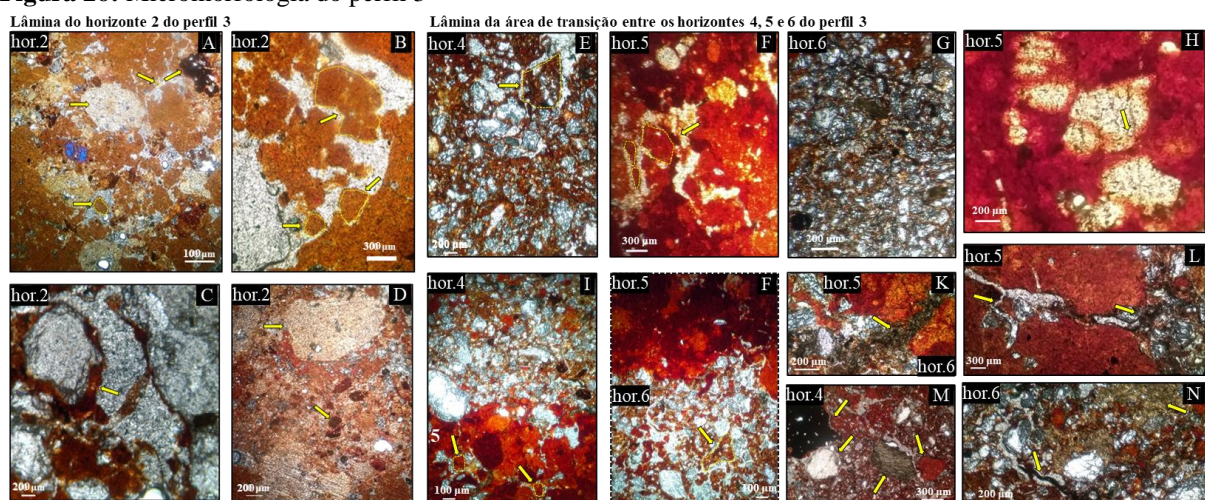


os nódulos foram identificados dentro de agregados (**Figura 25 C**), e foi descrita a presença de material de coloração escura dentro de poros do tipo canais e câmaras (**Figura 25 E**), corroborando com a hipótese de que está ocorrendo movimentação descendente de material. Em relação ao horizonte 2, chamou a atenção o fato de haver material fino, rico em óxidos, em processo de dissolução e migração no sentido de ocupar os poros (**Figura 25 D**).

Olhando a lâmina do horizonte 9 do perfil 2, descrito em campo como maciço, abundante quantidade de quartzo foi encontrada, bem como expressiva quantidade de material orgânico e argila (**Figuras 25 I, J, L e M**). Quanto à distribuição de seus constituintes, essa amostra foi classificada como predominantemente porfírica, mas com porções gefúricas e enáulicas. O sistema poroso do horizonte 9, em algumas zonas, apresentou a existência de material de coloração castanho escuro revestindo sua parede (**Figuras 25 K e M**) o que demonstra a existência de fluxo dentro do sistema poroso.

Considerando o perfil 3, diversas feições pedológicas foram observadas em nas lâminas delgadas. No horizonte 2, de distribuição porfírica (**Figuras 26 A e D**) e descrito em campo como formado por blocos, foram identificados *peds*, em forma de blocos (**Figuras 26 A e B**), compostos basicamente por material fino. Ainda que nesse horizonte haja considerável quantidade de quartzo (**Figura 26 C**), a argila exerce importante papel (**Figuras 26 K e M**) revestindo o material grosso. Feições possivelmente de origem antrópica foram descritas no horizonte 2, incluindo alguns nódulos opacos de tamanhos variados (**Figura 26 D**).

**Figura 26:** Micromorfologia do perfil 3



A artefato antrópico não identificado, nódulo e microagregado em bloco no horizonte 2; B microagregado em bloco no horizonte 2; C material argiloso em fissuras de quartzo no horizonte 2; D nódulos opacos e concentração de artefato antrópico não identificado no horizonte 2; E microagregados em blocos no horizonte 4; F microagregados em blocos no horizonte 5; G concentração de quartzo no horizonte 6; H material argiloso em fissuras de quartzo no horizonte 5; I microagregados no horizonte 5 em local de transição de horizontes; J microagregados no horizonte 6 próximo a ponto de transição entre horizontes; K material migrando entre os

horizontes 5 e 6; L material orgânico no sistema poroso do horizonte 5; M nódulos no horizonte 4; N filamento de possível origem antrópica no horizonte 6.

Uma das lâminas do perfil 3, permitiu a descrição micromorfológica de 3 horizontes, a saber, os horizontes 4, 5 e 6, os quais, em um primeiro momento apresentaram limite abrupto. Contudo, ao serem observados mais atentamente, em microscópico, os limites entre as camadas apresentaram sinais de interação entre os horizontes (**Figuras 26 I e J**). Em relação ao horizonte 4 do perfil 3, de distribuição porfírica com algumas áreas de distribuição enáulica (**Figuras 26 E**) e descrito em escala macro como formado por blocos, as lâminas permitiram a identificação de *peds* em blocos em micro escala (**Figuras 26 E**) e também de nódulos de colorações variadas (**Figuras 26 M**). O material fino que compõem o horizonte 4 é predominantemente composto por argila com óxidos (**Figuras 26 E e M**).

Subjacente ao horizonte 4, rico em fração grossa, o horizonte 5, de distribuição porfírica (**Figuras 26 F**) é formado principalmente por material fino, com a presença de poucos grãos de quartzo e um sistema poroso que delimita blocos (**Figuras 26 F e I**). Ainda no horizonte 5 do perfil 3, foram encontrados canais preenchidos com material orgânico (**Figuras 26 K e L**), sendo que há pontuais locais da zonas de transição entre os horizontes 5 e 6 onde esse material orgânico claramente está migrando de um horizonte para outro (**Figura 26 K**). Em alguns grãos de quartzos identificados no horizonte 5, suas fissuras, apresentaram a presença de material fino (**Figura 26 H**) composto basicamente por argilominerais e óxidos de ferro, o que pode indicar a ocorrência do processo de *plasma infusion*, processo que leva a transformação de partículas de areia em partículas de silte (ESWARAN *et al.*, 1975), que por consequência de sua dimensão, tem maior atividade química em sua superfície do que a areia que o originou (FURQUIM, 2002).

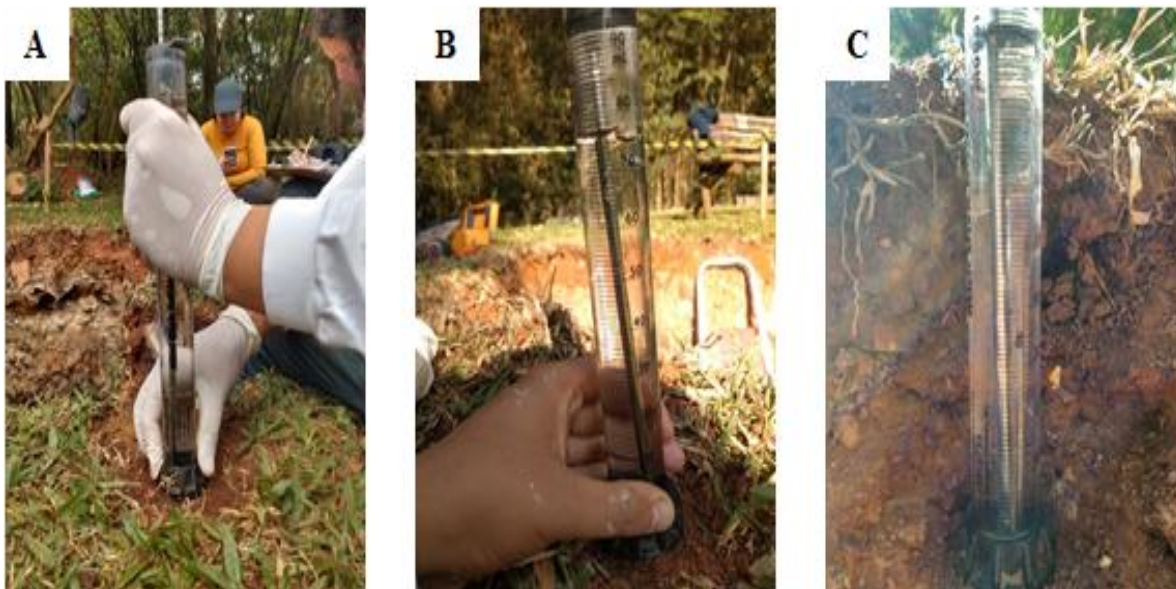
Assim como o horizonte 4, o horizonte 6, de distribuição gefúrica (**Figura 26 G**), também foi descrito como rico em fração grossa. Se em campo esse horizonte foi facilmente descrito como formado por blocos. Em lâminas, os *peds*, também foram classificados como em blocos, mas devido ao seu fraco grau de pedalidade, eram pouco distintos. Foi identificada a presença de material fino de duas colorações e também de material possivelmente de origem antropogênica em forma de filamento (**Figura 26 N**).

## 5.5 – Análises físicas

### 5.5.1 – Infiltração e condutividade hidráulica não saturada

A infiltração, determinada em campo nos horizontes com estrutura pedogenética e em horizontes maciços e em grãos soltos selecionados (**Figura 27**) apresentou resultados similares entre os perfis 2 e 3, mas muito discrepantes em relação ao perfil 1 (**Tabela 9**).

**Figura 27:** Utilização do infiltrômetro em campo



A e B: utilização do infiltrômetro nos horizontes superficiais de perfis de solos. C: o mesmo, em subsuperfície. Elaborado pela autora.

Os dados de infiltração do perfil 1 mostraram que no hor.1, composto predominantemente por estrutura granular de textura média e alguns blocos subangulares de textura média, houve o valor mais alto de infiltração, ou seja,  $28,47 \text{ cm h}^{-1}$ . Já no início do horizonte subsequente (hor.2), o qual possui os mesmos tipos de estruturas do horizonte 1, porém maior presença de argila, houve diminuição da infiltração para  $9,35 \text{ cm h}^{-1}$ .

Esses dados corroboram com a porosidade identificada pelo MLT (**Figura 18**), que mostra uma quantidade muito maior de poros  $> 1 \text{ mm}$  no hor. 1 em relação ao hor. 2. À profundidade de 54 cm, quando ocorre o primeiro horizonte de característica maciça (hor.6), a infiltração apresentou o menor valor ( $0,69 \text{ cm h}^{-1}$ ). Contudo, o valor de infiltração aumenta significativamente no horizonte 8 (103 cm), também de característica maciça, com  $13,37 \text{ cm h}^{-1}$  de infiltração.

No perfil 2, a infiltração foi maior no hor. 1 ( $7,43 \text{ cm h}^{-1}$ ) em relação ao hor. 2 ( $6,95 \text{ cm h}^{-1}$ ), mas sem se observar uma grande diferença entre ambos, em acordo com os dados de MLT (**Figura 18**). O último horizonte medido (hor.9), de característica maciça, em campo, mas com estruturas em blocos, segundo o MLT (**Figura 18**), representou um grande aumento na infiltração ( $14,9 \text{ cm h}^{-1}$ ), sendo nesse caso, o maior valor registrado no perfil. Esse horizonte

apresentou a maior área de poros do perfil, conforme os resultados do MLT, com o total de 5% da área total.

No perfil 3, os valores da infiltração foram muito diversos. Os valores de infiltração do hor. 1 são maiores que os do hor. 2, estando de acordo com os dados de MLT. Entretanto, nos horizontes 3 a 5, onde há registro de uma área de poros superior ao dos horizontes 1 e 2, os dados são muito variáveis, com o registro de valores extremos de infiltração (entre 0 e 10 cm h<sup>-1</sup>). Por fim, no horizonte 10, apesar de ter sido registrado a maior área de poros do perfil, as taxas de infiltração são baixas (1,53 cm h<sup>-1</sup>)

**Tabela 9:** Infiltração e condutividade hidráulica não saturada

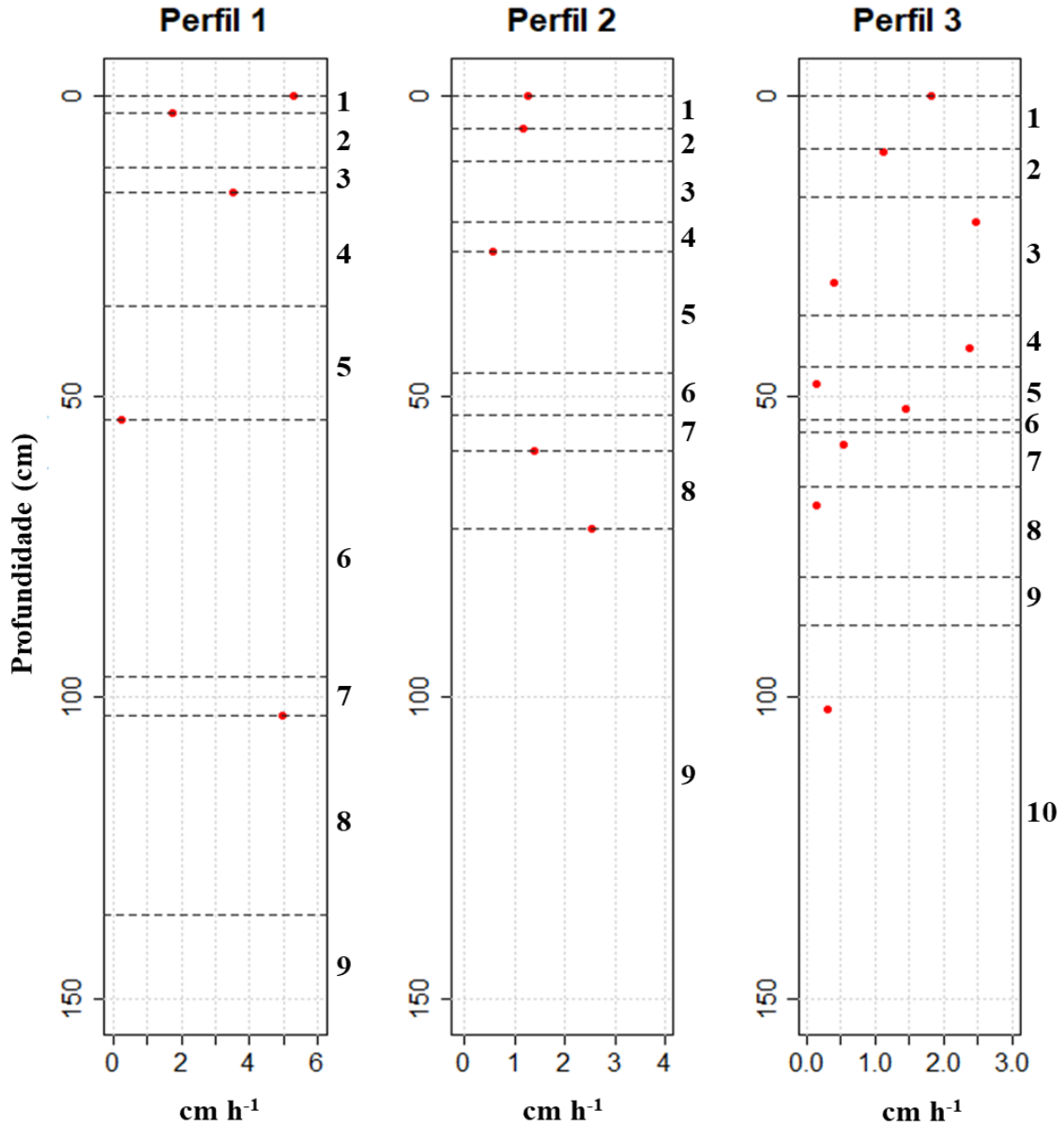
Perfil	Profundidade (cm)	Horizonte	Estruturas	Infiltração (cm h <sup>-1</sup> )	Condutividade Hidráulica (cm h <sup>-1</sup> )
1	0	1	Granulares e blocos	28,47	5,30
	3	2	Granulares e blocos	9,35	1,74
	16	3	Blocos e laminar	11,31	3,52
	54	6	Maciça	0,69	0,24
	103	8	Maciça	13,37	4,00
2	0	1	Granulares e blocos	7,43	1,26
	5,5	2	Granulares e blocos	6,95	1,18
	26	5	Maciça	1,83	0,57
	59	8	Grãos soltos	4,12	1,38
	72	9	Maciça	14,90	2,54
3	0	1	Granulares e blocos	7,24	1,8
	9,5	2	Blocos	4,45	1,11
	21	3	Blocos	10,15	2,47
	31	3	Blocos	1,62	0,40
	42	4	Granulares e blocos	10,20	2,37
	48	5	Blocos	0,06	0,01
	52	5	Blocos	6,52	1,44
	58	7	Maciça	2,41	0,53
	68	8	Maciça	0,52	0,13
	102	10	Blocos	1,53	0,31

Comportamento hídrico da água incluindo análise em horizontes com e sem estrutura. Elaborado pela autora.

O comportamento da infiltração e da condutividade em profundidade (**Figura 28**) mostra que para os três perfis, a tendência é que haja diminuição do fluxo hídrico imediatamente abaixo do horizonte superficial.

Há, entretanto, um comportamento mais irregular entre os horizontes maciços, que apresentam altos ou baixos valores. Ressalta-se, ainda, que altas taxas de infiltração em horizontes de maiores profundidades ocorrem apenas nos perfis 1 e 2 (**Figura 28**), apesar de nos dados do MLT tais horizontes sempre registrarem a maior área de poros (> 1mm) das amostras analisadas.

Figura 28: Comportamento hídrico em profundidade



As linhas tracejadas horizontalmente representam as mudanças entre horizontes dentro dos perfis. Elaborado pela autora.

### 5.5.2 – Diâmetro Médio Ponderado (via seca e úmida) e Índice de Estabilidade de Agregados

Utilizando amostras coletadas dentro dos horizontes com presença de estruturas, a análise do Diâmetro Médio Ponderado-via seca (DMPs) apresentou valores superiores (5.92 a 6,64 mm) em relação aos dados de Diâmetro Médio Ponderado-via úmida (DMPu) (5.22 a 6.49 mm) (**Tabela 10**). O Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) apresentou uma variação entre 82 e 97%, sendo que os horizontes mais profundos do perfil 1 (5) e do perfil 3 (5) tendem a apresentar valores mais baixos, ou seja, menor estabilidade dos agregados.

Apesar da menor resistência em profundidade, os valores acima de 86% foram tendência dentro do universo amostral, inclusive alcançando valores de até 99%, no caso do horizonte 1 do perfil 2.

Esses dados demonstram que os agregados apresentaram boa estabilidade, o que significa grande resistência à desagregação durante os ensaios. Os valores de DMPs acima dos valores encontrados para o DMPu refletiram em um alto IEA.

**Tabela 10:** Diâmetro médio ponderado via seca e via úmida

Perfil	Horizonte	Estruturas	DMPs (mm)	DMPu (mm)	IEA (%)
1	01	Granulares e blocos	5.99	5.51	92
	02	Granulares e blocos	6.32	5.84	92
	03	Blocos e laminar	6.12	5.86	96
	05	Maciça e blocos	6.39	5.64	88
2	01	Granulares e blocos	6.10	5.88	96
	02	Granulares e blocos	6.03	5.86	97
3	01	Granulares e blocos	5.92	5.84	99
	02	Blocos	6.50	5.64	87
	04	Granulares e blocos	6.64	6.49	98
	05	Blocos	5.95	5.22	88
	10	Blocos	6.70	6.30	94

Elaborado pela autora.

Considerando os perfis 1 e 3, onde há mais do que duas amostras, fica evidente que apesar da tendência de diminuição do IEA, os valores são oscilantes dentro do perfil, com valores diversos mesmo nos casos onde os tipos de estruturas descritas são iguais, como no caso dos horizontes 4 e 5 do perfil 3, onde a predominância de blocos subangulares não significou IEA similares, mas sim distantes entre si em 10%.

A falta de correlação entre o tipo de estrutura e o IEA também foi observada em relação aos horizontes 3, 4 e 5, onde os valores foram respectivamente 92, 96 e 86 % para estruturas subangulares.

Analisando o DMP<sub>u</sub>, o índice de circularidade média e a moda são de aproximadamente 0,7 antes do procedimento de agitação em água, mantendo-se após o teste, tanto nos agregados retidos na peneira de malha 2 mm quanto nos agregados retidos na peneira de malha de 1 mm (**Tabela 11**), ou seja, a circularidade dos agregados permaneceu praticamente constante.

O índice de circularidade máximo com valor de 0,892 foi encontrado na peneira de 1 mm em uma amostra do perfil 3, mais precisamente no horizonte 5 (45-56 cm) após a agitação em água. Já o valor de menor circularidade foi de 0,44 para um agregado que estava também em amostra retida em peneira de 1 mm, mas em amostra do horizonte 1 (0-5,5 cm) do perfil 2 (**Figura 29**).



**Tabela 11:** Circularidade dos agregados submetidos à análise de DMPu

<b>Circularidade dos agregados antes do teste para determinação do DMP<sub>u</sub></b>							
Perfil	Horizonte	Mínimo	Máximo	Média	Moda	Desvio Padrão	CV (%)
1	1	0,53	0,83	0,68	0,69	0,06	9
	2	0,57	0,82	0,70	0,71	0,05	7
	3	0,53	0,81	0,70	0,71	0,06	9
	5	0,57	0,86	0,73	0,73	0,06	8
2	1	0,44	0,79	0,66	0,67	0,06	9
	2	0,52	0,78	0,67	0,67	0,05	7
3	1	0,53	0,81	0,70	0,70	0,05	7
	2	0,50	0,81	0,70	0,71	0,06	9
	4	0,53	0,82	0,70	0,70	0,05	7
	5	0,54	0,85	0,73	0,74	0,06	8
	10	0,52	0,81	0,69	0,69	0,04	6
<b>Circularidade dos agregados após o teste para determinação do DMP<sub>u</sub> (peneira de 1 mm)</b>							
Perfil	Horizonte	Mínimo	Máximo	Média	Moda	Desvio Padrão	CV
1	1	0,46	0,85	0,66	0,66	0,08	12
	2	0,55	0,78	0,70	0,70	0,06	9
	3	0,55	0,86	0,74	0,75	0,07	9
	5	0,59	0,88	0,73	0,73	0,07	10
2	1	0,33	0,81	0,69	0,70	0,09	13
	2	0,50	0,85	0,72	0,72	0,07	10
3	1	0,58	0,83	0,70	0,69	0,06	9
	2	0,56	0,85	0,73	0,73	0,07	10
	4	0,47	0,86	0,70	0,69	0,09	13
	5	0,57	0,89	0,77	0,77	0,06	8
	10	0,45	0,82	0,70	0,71	0,06	9
<b>Circularidade dos agregados após o teste para determinação do DMP<sub>u</sub> (peneira de 2 mm)</b>							
Perfil	Horizonte	Mínimo	Máximo	Média	Moda	Desvio Padrão	CV
1	1	0,54	0,81	0,69	0,70	0,05	7
	2	0,57	0,81	0,71	0,72	0,04	6
	3	0,60	0,84	0,73	0,73	0,05	7
	5	0,60	0,83	0,74	0,74	0,05	7
2	1	0,51	0,79	0,67	0,67	0,06	9
	2	0,49	0,79	0,68	0,69	0,05	7
3	1	0,53	0,81	0,72	0,72	0,05	7
	2	0,53	0,80	0,70	0,71	0,05	7
	4	0,57	0,82	0,71	0,70	0,05	7
	5	0,62	0,85	0,73	0,73	0,05	7
	10	0,56	0,86	0,7	0,71	0,05	7

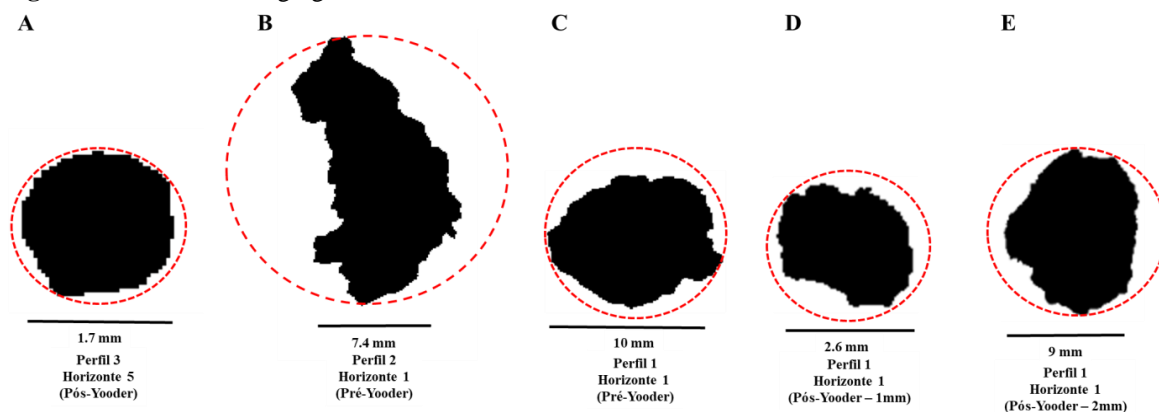
CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

Corroborando com a descrição macromorfológica, a dispersão e lavagem dos agregados para determinação da massa retida em cada malha revelou a existência materiais antropogênicos em alguns agregados, muito deles imperceptíveis à visão humana sem auxílio de equipamento de aumento (**Figura 30**).

O material antropogênico predominante dentro dos agregados foi identificado como do tipo plástico, de características diversas, como dureza e cor. No perfil 1 foram encontrados fragmentos plásticos, aparentemente diferentes entre si, nos horizontes 1 e 2 (**Figuras 30 A e B**). Já o perfil 2, também apresentou plásticos de qualidades diferentes dentro dos agregados

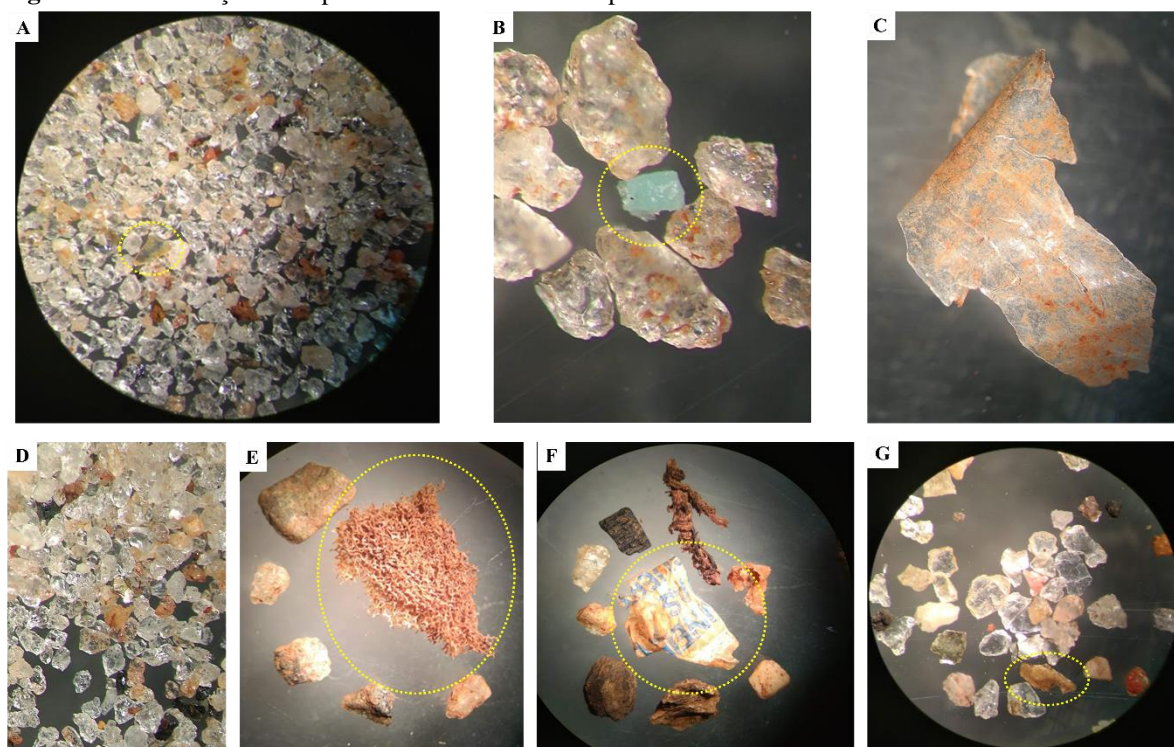
(Figuras 30 F e G). O perfil 3 foi o que apresentou mais materiais antrópicos em seus agregados, ao todo foram encontrados 3 exemplares após a dispersão, sendo dois fragmentos plásticos e um pedaço de esponja (Figuras 30 E, F e G). Vale ressaltar que em nenhum dos horizontes onde ocorreram agregados com presença de material antrópico havia sido descrito a existência dos mesmos materiais durante a descrição morfológica de campo.

**Figura 29:** Silhuetas de agregados



A imagem A apresenta a silhueta de um agregado do horizonte 5 o perfil 3, retido na peneira de 1 mm com maior índice de circularidade (0,89); a imagem B mostra a silhueta do agregado do horizonte 1 do perfil 2 com menor índice de circularidade (0,44). As imagens C, D e E mostram exemplos de agregados com média de circularidade em 0,7. Elaborado pela autora.

**Figura 30:** Observação em lupa de materiais retidos em peneira



A, B, D e G: materiais retidos nas peneiras após a dispersão com NaOH, com evidente predomínio de quartzo, porém com a presença de plástico destacado nas imagens por círculos amarelos; C e F fragmento plástico; E pedaço de esponja. Elaborado pela autora.

### 5.5.3 – Densidade aparente

A densidade aparente ( $D_s$ ) das amostras refletiram as características físicas e morfológicas descritas em campo. Horizontes de característica maciça apresentaram os maiores valores de  $D_s$ , enquanto os horizontes descritos como de estrutura em blocos e em granulares apresentaram valores menores (**Tabela 12**).

Os dados de desvio padrão evidenciam que houve pouca discrepância entre os valores, de modo que não foi encontrado horizonte com  $D_s$  muito diferente dos demais, o que também está claro na **figura 31** onde não há a presença de outliers em forma de pontos.

**Tabela 12:** Resultado das análises de densidade aparente

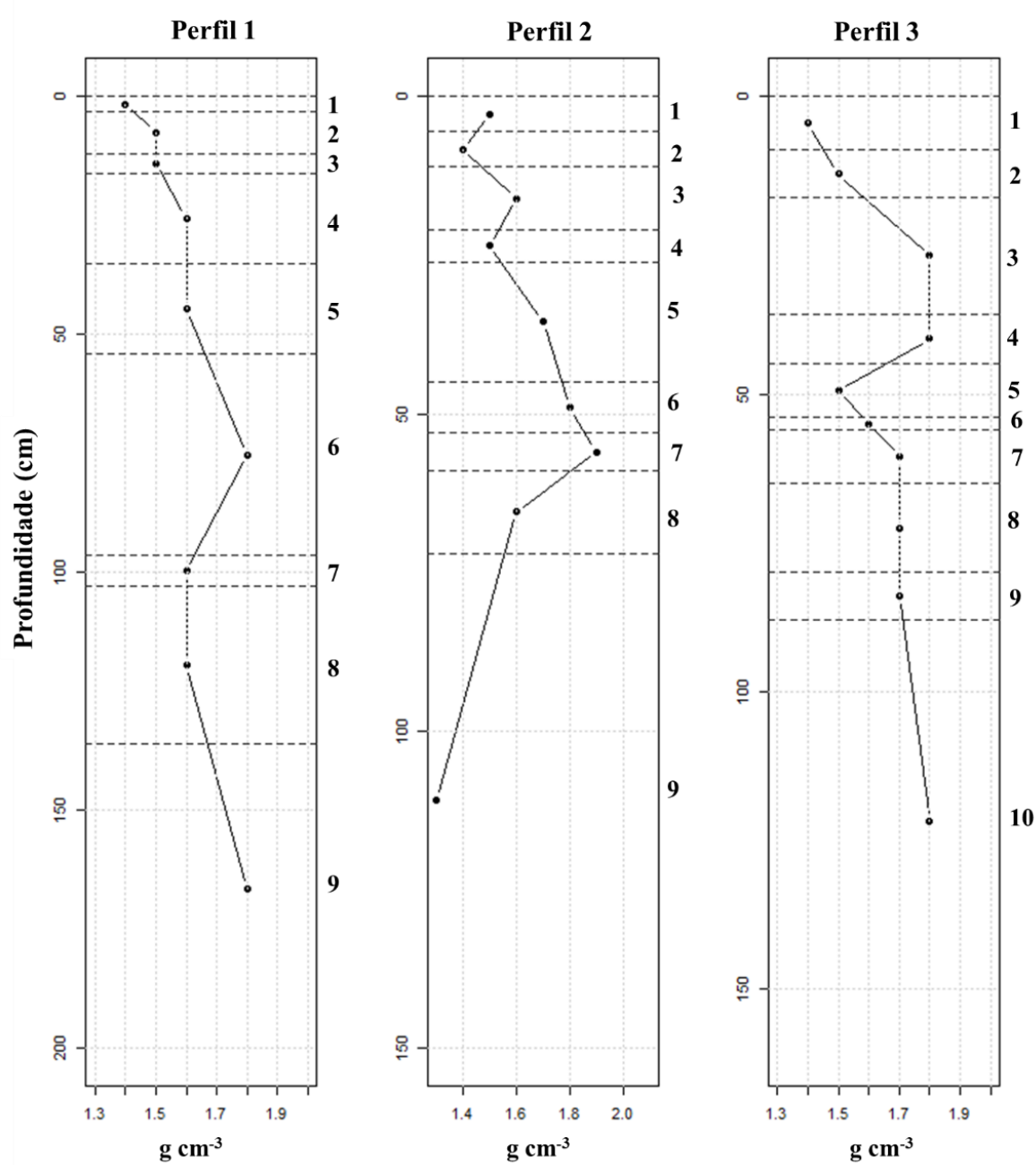
Perfil	Hor.	Espessura (cm)	$D_s$ ( $g\ cm^{-3}$ )	Estruturas campo	Estruturas MLT	Estruturas micromorfologia
1	1	3,0	1,4	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Granular e blocos
	2	9,0	1,5	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Granular e blocos
	3	4,0	1,5	Blocos e laminar		
	4	19,0	1,6	Maciça	Blocos	Maciça e blocos
	5	19,0	1,6	Maciça e blocos		
	6	42,5	1,8	Maciça		
	7	6,5	1,6	Maciça		
	8	33,0	1,6	Maciça		
	9	61,0	1,8	Maciça		
2	1	5,5	1,5	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Blocos
	2	5,5	1,4	Granulares e blocos	Blocos	Blocos
	3	10,0	1,6	Grãos soltos		
	4	5,0	1,5	Maciça		
	5	19,0	1,7	Maciça		
	6	8,0	1,8	Maciça		
	7	6,0	1,9	Maciça		
	8	13,0	1,6	Grãos soltos		
	9	78,0	1,3	Maciça	Blocos	Blocos
3	1	9,0	1,4	Granulares e blocos	Granulares	
	2	8,0	1,5	Blocos	Blocos	Blocos
	3	19,5	1,8	Blocos		
	4	8,5	1,8	Blocos	Blocos	Blocos
	5	9,0	1,5	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Blocos
	6	2,0	1,6	Blocos		Blocos
	7	9,0	1,7	Maciça		
	8	15,0	1,7	Maciça		
	9	8,0	1,7	Maciça		
	10	68,0	1,8	Blocos	Blocos	
				<b>Perfil 1</b>	<b>Perfil 2</b>	<b>Perfil 3</b>
<b>Média (<math>g\ cm^{-3}</math>)</b>				1,6	1,6	1,6
<b>Desvio padrão</b>				0,1	0,2	0,1
<b>CV (%)</b>				6	13	6

CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

No perfil 1, o maior valor de  $D_s$  ( $1,8\ g\ cm^{-3}$ ) corresponde aos horizontes 6 e 9, ambos descritos em campo como maciços. Contudo, no caso do horizonte 9, o MLT identificou a presença de blocos. Já o valor mínimo de  $D_s$  do perfil 1 foi de  $1,4\ g\ cm^{-3}$  no horizonte 1, o qual

é formado pela associação entre grumos e blocos. No perfil 2, o valor máximo de  $D_s$  foi de  $1,9 \text{ g cm}^{-3}$ , o maior dentre todas as amostras, considerando os três perfis de solo analisados. Esse valor máximo foi encontrado no horizonte 7, descrito em campo como maciço. Já o valor mínimo de  $D_s$  do perfil 2 foi de  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$  no horizonte 9, rico em matéria orgânica, e também de característica maciça em campo, mas com estruturas em blocos segundo o MLT e a micromorfologia.

**Figura 31:** Densidade aparente



Percebe-se variabilidade da densidade aparente em profundidade. Elaborado pela autora.

No perfil 3, o valor máximo de Ds foi encontrado nos horizontes 3, 4 e 10 (1,8 g cm<sup>3</sup>), sendo que nesse caso, chama a atenção o fato dos três horizontes serem caracterizados como estruturas em blocos e não maciça. Já o valor mínimo de Ds no perfil 3 foi encontrado no horizonte 1 (1,4 g cm<sup>3</sup>), formado por grumos e blocos.

#### 5.5.4 – Densidade da partícula

Em todos os horizontes foi definida a densidade de partícula a partir de amostras deformadas, seguindo o método do balão volumétrico. Os resultados obtidos apresentaram variação em profundidade (**Figura 32**) o que pode ser comprovado pelos dados estatísticos descritivos (**Tabela 13**). Para o perfil 1, a média da densidade de partícula foi de 2,4 g cm<sup>-3</sup>, com o valor máximo de 2,8 g cm<sup>-3</sup> no horizonte 3 e mínimo de 2,1 g cm<sup>-3</sup> no horizonte 4. Esses horizontes são de característica textural média. Em campo o horizonte 3 foi descrito como formado pela associação entre estruturas do tipo blocos e laminar, e o horizonte 4 como maciço, porém o MLT apontou a existência de blocos. O desvio padrão dos dados (0,19) mostram que ocorre entre os horizontes do perfil 1 uma variação de dados não expressiva.

O perfil 2, entre os três perfis de solo, é o que apresentou maior valor de densidade de partícula (3,1 g cm<sup>-3</sup> no hor.5) e também o menor valor (2 g cm<sup>-3</sup> no hor.6). O horizonte de maior densidade partícula é de textura argilosa e aspecto maciço, enquanto que o horizonte de menor densidade é de textura média e conserva o mesmo tipo de estrutura do horizonte superior. Considerando todos os horizontes do perfil 2, a média dos valores foi de 2,4 g cm<sup>-3</sup> e o desvio padrão de 0,34, o maior desvio padrão dentre todos os perfis.

**Tabela 13:** Resultado das análises de densidade de partícula

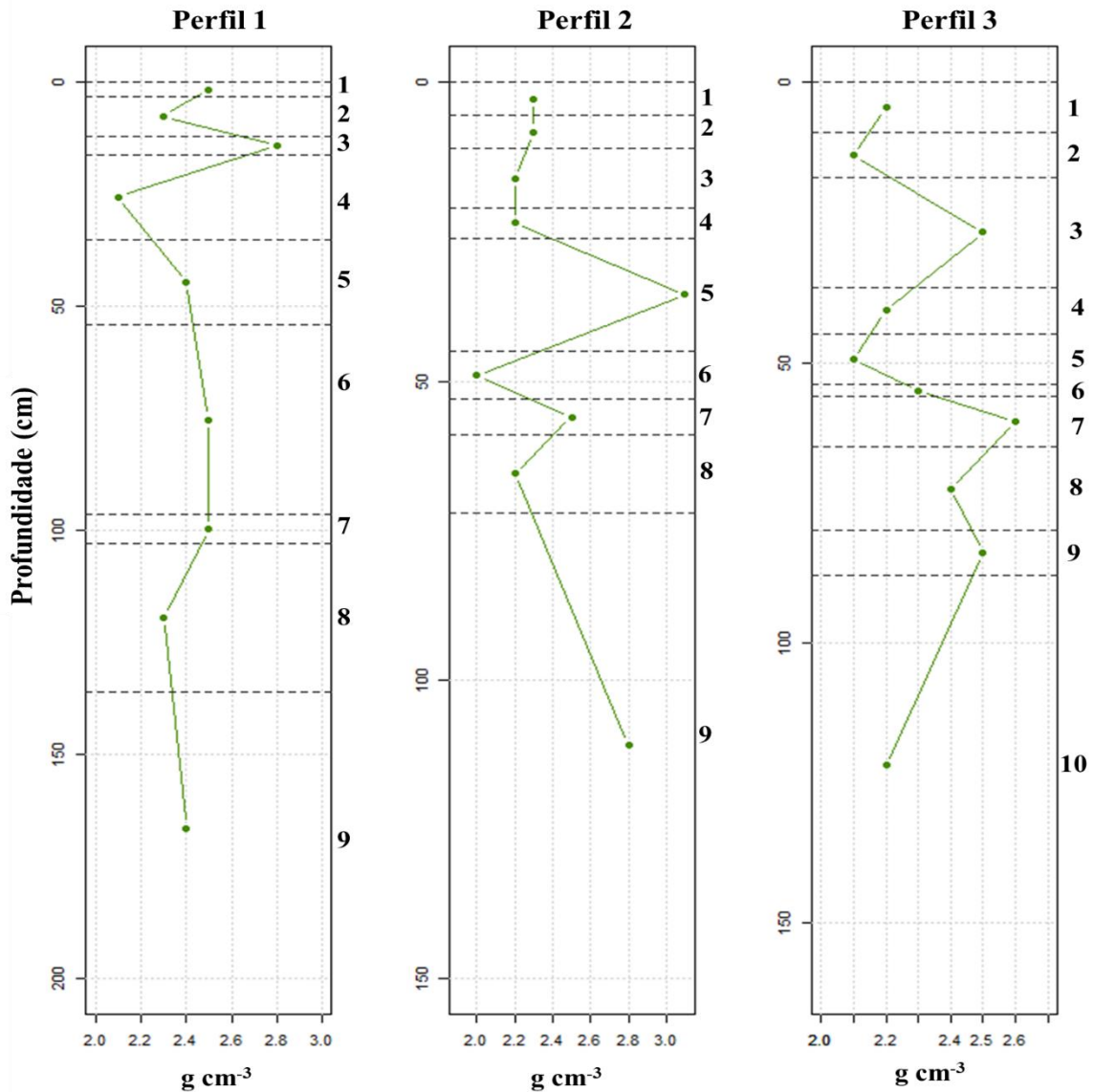
	<b>Perfil 1</b>	<b>Perfil 2</b>	<b>Perfil 3</b>
Máximo (g cm <sup>-3</sup> )	2,8	3,1	2,6
Mínimo (g cm <sup>-3</sup> )	2,1	2,0	2,1
Média (g cm <sup>-3</sup> )	2,4	2,4	2,3
Desvio padrão	0,19	0,34	0,17
CV (%)	8	14	7

CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora

Observando os dados do perfil 3, o maior valor de densidade de partícula está no horizonte 7 (2,6 g cm<sup>-3</sup>) e o menor nos horizontes 2 e 5 (2,1 g cm<sup>-3</sup>). Quanto a relação entre textura, estrutura e a densidade de partícula, o horizonte 7 é de textura média e estrutura maciça. A menor densidade de partícula está em dois horizontes de característica argilosa e nos quais ocorre a presença de blocos (hor.2 e hor.5). No caso do horizonte 5 do perfil 3 o MLT apontou

além da presença de blocos, a existência de estruturas granulares. O perfil 3 apresenta média de  $2,3 \text{ g cm}^{-3}$  e desvio padrão de 0,17, o menor valor entre todos os perfis estudados.

**Figura 32:** Densidade de partícula



A imagem mostra variação da densidade de partícula nos três perfis de solos analisados. Elaborado pela autora.

### 5.5.5 – Porosidade total

Os dados indicam uma possível associação entre essa propriedade do solo e tipo de estrutura predominante nos horizontes. Valores mais elevados de porosidade estão ligados à presença de estruturas em blocos e granulares (Tabela 14).

Os perfis apresentarem variabilidade dos valores de porosidade em profundidade (Figura 33). No caso do perfil 1, o valor máximo de porosidade total foi de  $0,45 \text{ g cm}^{-3}$  no horizonte 3, com estrutura em blocos e laminar, enquanto o mínimo foi de  $0,25 \text{ g cm}^{-3}$  no

horizonte 9, maciço em campo, com desvio padrão no perfil como um todo de apenas 0,07 g cm<sup>-3</sup>. O valor mínimo de no perfil 2 foi de 0,1 g cm<sup>-3</sup> no horizonte 6, o qual é de estrutura maciça. Já o valor máximo foi encontrado no horizonte 9 (0,55 g cm<sup>-3</sup>), o mesmo de menor densidade e rico em carbono orgânico. No perfil 3, o maior valor foi de 0,38 no horizonte 1 e menor valor de 0,18 g cm<sup>-3</sup> no horizonte 10, ambos de estruturas em blocos.

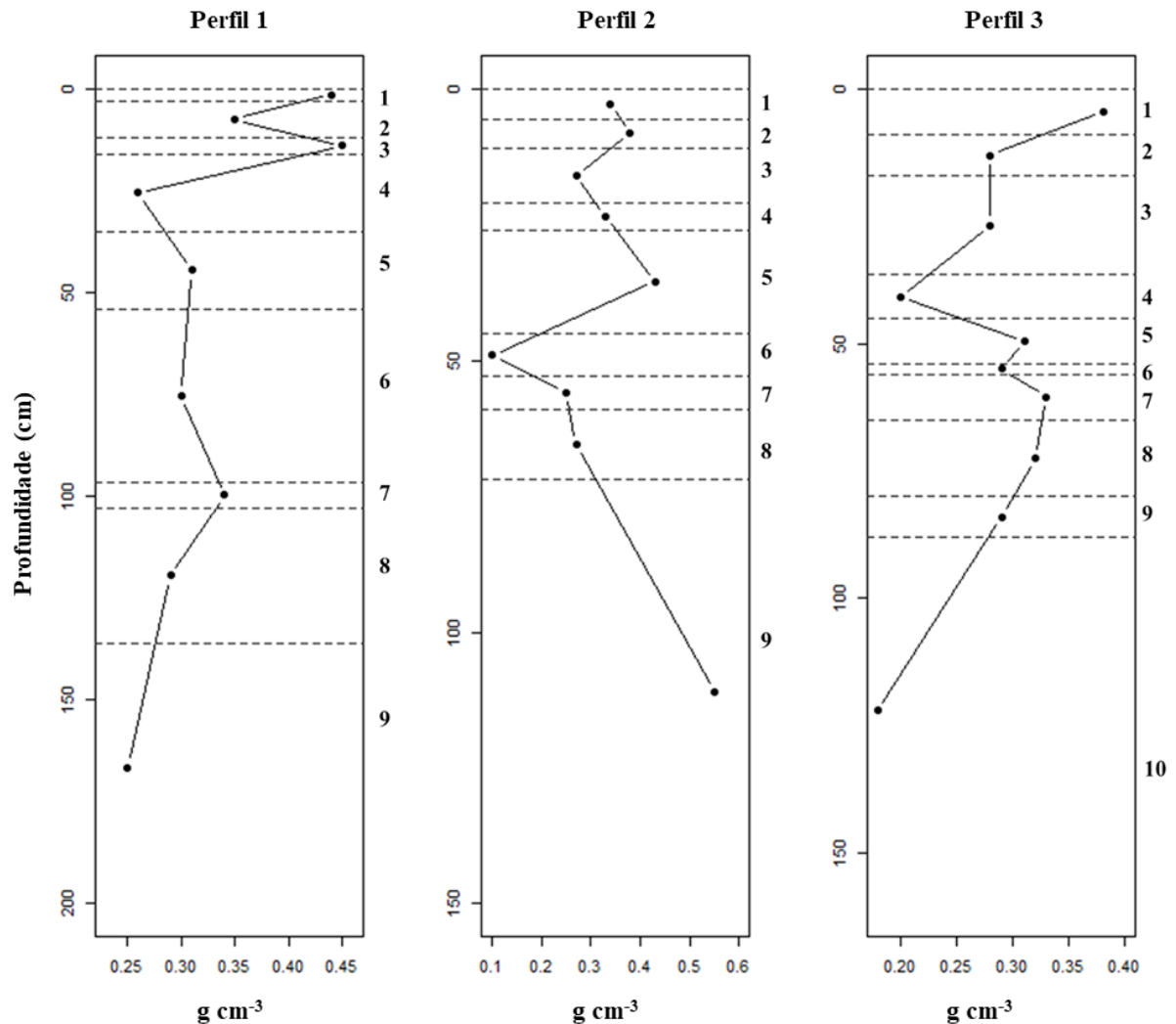
A porosidade total afeta a percolação de solução ao longo dos perfis. No perfil 1, por exemplo, o horizonte 1, apresenta os maiores valores tanto de porosidade como de condutividade e infiltração. No perfil 2, também há correspondência direta entre o maior valor de porosidade, condutividade hidráulica e infiltração no horizonte 9. No perfil 3, é o horizonte 1 de maior porosidade, horizonte com o segundo maior valor de condutividade hidráulica e infiltração.

**Tabela 14:** Resultado das análises de porosidade total

Perfil	Hor.	Espessura (cm)	Porosidade total (g cm <sup>-3</sup> )	Estruturas campo	Estruturas MLT	Estruturas micromorfologia
1	1	3,0	0,44	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Granular e blocos
	2	9,0	0,35	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Granular e blocos
	3	4,0	0,45	Blocos e laminar		
	4	19,0	0,26	Maciça		Maciça e blocos
	5	19,0	0,31	Maciça e blocos		
	6	42,5	0,30	Maciça		
	7	6,5	0,34	Maciça		
	8	33,0	0,29	Maciça		
	9	61,0	0,25	Maciça	Blocos	
2	1	5,5	0,34	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Blocos
	2	5,5	0,38	Granulares e blocos	Blocos	Blocos
	3	10,0	0,27	Grãos soltos		
	4	5,0	0,33	Maciça		
	5	19,0	0,43	Maciça		
	6	8,0	0,10	Maciça		
	7	6,0	0,25	Maciça		
	8	13,0	0,27	Grãos soltos		
	9	78,0	0,55	Maciça	Blocos	Blocos
3	1	9,0	0,38	Granulares e blocos	Grumos	
	2	8,0	0,28	Blocos	Blocos	Blocos
	3	19,5	0,28	Blocos		
	4	8,5	0,20	Blocos	Blocos	Blocos
	5	9,0	0,31	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Blocos
	6	2,0	0,29	Blocos		Blocos
	7	9,0	0,33	Maciça		
	8	15,0	0,32	Maciça		
	9	8,0	0,29	Maciça		
	10	68,0	0,18	Blocos	Blocos	
				<b>Perfil 1</b>	<b>Perfil 2</b>	<b>Perfil 3</b>
Média (g cm <sup>-3</sup> )				0,33	0,32	0,28
Desvio padrão				0,07	0,11	0,06
CV				2	34	21

Hor.: horizonte; CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

Figura 33: Porosidade



A imagem mostra variação da porosidade nos três perfis de solos analisados. Destaca-se o fato do perfil 2 ter tendência de aumento da porosidade, em oposição aos outros dois perfis. Elaborado pela autora.

### 5.5.6 – Granulometria

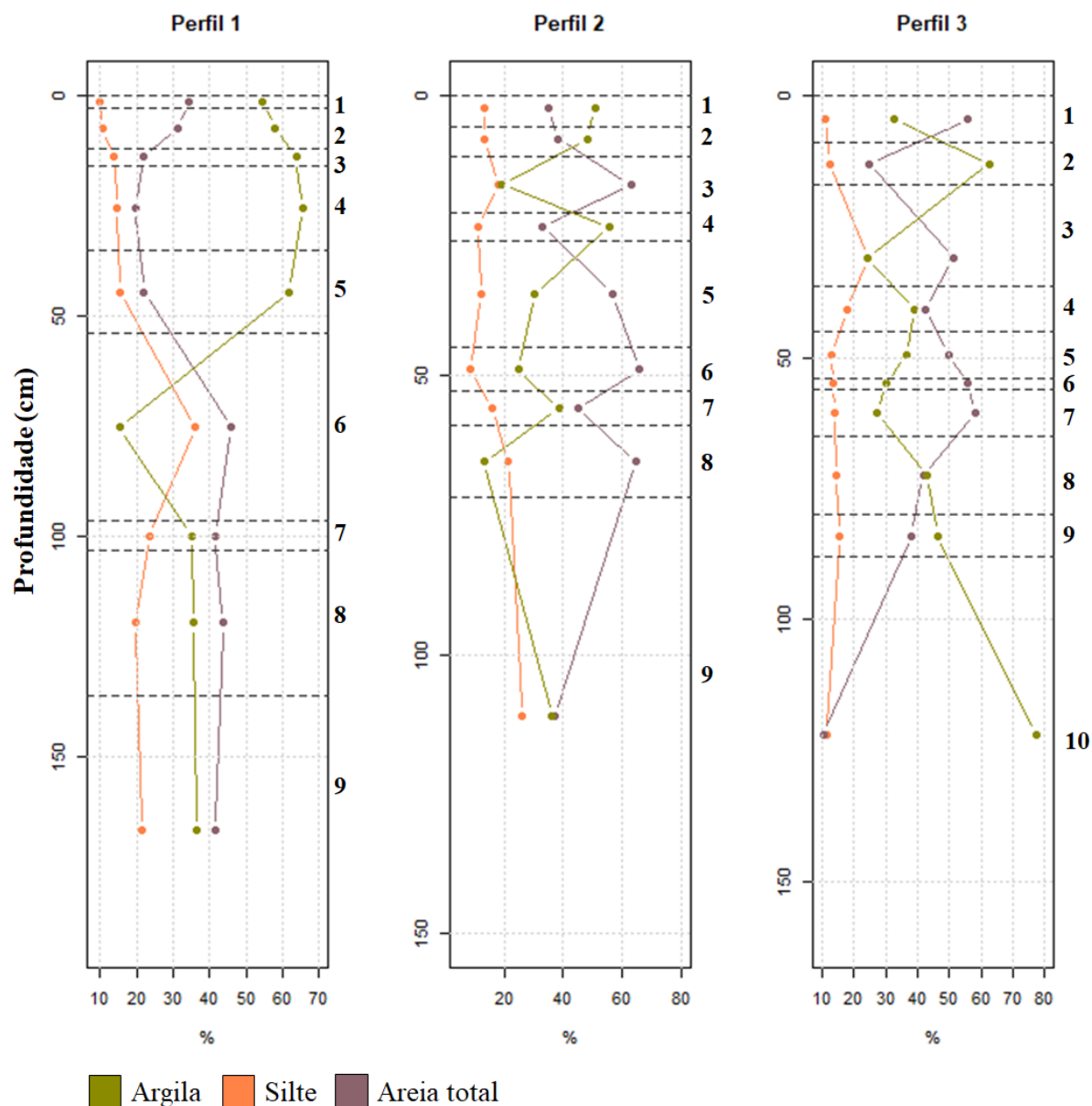
Os dados de granulometria mostram uma variação em profundidade das características dos horizontes (**Figura 34**).

Conforme os dados de granulometria do perfil 1 (**Tabela 15**), percebe-se textura argila nos horizontes 1 e 2 e muito argilosa nos horizontes 3 a 5 (até 54 cm), com valores de argila entre 546 e 648 g kg<sup>-1</sup>. A maioria destes horizontes apresenta estrutura granular ou em blocos, com exceção do 4, que é maciço em campo, mas com blocos de acordo com o MLT e a micromorfologia. Ressalta-se que o horizonte 4 é o de maior teor de argila entre todos os horizontes identificados no perfil 1 (658 g kg<sup>-1</sup>) e o de menor conteúdo de areia total (195 g kg<sup>-1</sup>). No horizonte 6, de característica maciça, a textura é franca e o conteúdo de argila ocupa a menor proporção em relação às outras duas frações (152 g kg<sup>-1</sup>). Este horizonte é o mesmo que



obteve o menor valor de condutividade hidráulica ( $0,24 \text{ cm h}^{-1}$ ) e infiltração de apenas  $0,69 \text{ cm h}^{-1}$ . Do horizonte 7 ao 9, todos maciços, a textura é franco-argilosa e conteúdo de argila volta a ser elevado ( $350$  a  $363 \text{ g kg}^{-1}$ ), sendo superior ao conteúdo de silte, porém, se mantém inferior ao conteúdo de areia total.

**Figura 34:** Distribuição granulométrica



A imagem mostra a distribuição granulométrica nos três perfis de solos analisados. Elaborado pela autora.

No perfil 2 (**Tabela 15**), assim como no perfil 1, o horizonte superficial (1), formado por grumos e blocos, apresenta textura argila, com total de  $507 \text{ g kg}^{-1}$  desta fração. Os horizontes 2 e 4, de estrutura de grumos/blocos e maciça, respectivamente, também são argilosos, com  $481$  e  $557 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto a maioria dos outros horizontes (5, 6, 8, 9), maciços ou formados por

grãos soltos, apresentam uma variação de textura franca (franco-argiloarenosa, franco arenosa, franco-argilosa), apresentando máximo de 363 g kg<sup>-1</sup> de argila.

**Tabela 15:** Resultado das análises de granulometria

Perfil	Hor.	Argila	Silte	Areia Total	Classificação textural (USDA)
		< 0,002 mm	0,053-0,002 mm	2,00-0,053 mm	
		g kg <sup>-1</sup>			
1	1	546	100	344	Argila
	2	580	107	312	Argila
	3	637	138	218	Muito Argilosa
	4	658	146	195	Muito Argilosa
	5	618	153	219	Muito Argilosa
	6	152	362	460	Franca
	7	350	234	415	Franco-argilosa
	8	356	198	437	Franco-argilosa
	9	363	214	416	Franco-argilosa
2	1	507	135	351	Argila
	2	481	135	384	Argila
	3	192	180	628	Franco-arenosa
	4	557	112	330	Argila
	5	303	125	565	Franco-argiloarenosa
	6	249	86	658	Franco-argiloarenosa
	7	385	162	448	Argiloarenosa
	8	133	214	646	Franco-arenosa
	9	363	260	372	Franco-argilosa
3	1	326	110	560	Franco-argiloarenosa
	2	626	123	248	Muito Argilosa
	3	243	242	514	Franco-argiloarenosa
	4	392	178	426	Franco-argilosa
	5	364	127	498	Argiloarenosa
	6	303	135	559	Franco-argiloarenosa
	7	274	137	580	Franco-argiloarenosa
	8	431	143	418	Argila
	9	462	155	381	Argila
	10	775	114	102	Muito Argilosa

Hor.: horizonte; Elaborado pela autora.

É importante ressaltar que nos horizontes 5, 6, 7 e 9, a estrutura maciça em campo ocorre associada a elevados teores de areia total (hor. 5, 6, 7 e 9). O horizonte 8, descrito como de grãos soltos, é o de menor teor de argila (133 g kg<sup>-1</sup>) e o segundo maior em quantidade de areia total (646 g kg<sup>-1</sup>), atrás do horizonte 6 (658 g kg<sup>-1</sup>). Os maiores valores de condutividade hidráulica e infiltração são respectivamente, 2,54 cm h<sup>-1</sup> e 14,90 cm h<sup>-1</sup>, determinados no horizonte 9, o qual é classificado como maciço e franco-argiloso.

No perfil 3 (**Tabela 15**), diferentemente dos outros dois perfis, o horizonte superficial (1) é franco-argiloarenoso, com 326 g kg<sup>-1</sup> de argila, enquanto o subjacente é muito argiloso, atingindo 626 g kg<sup>-1</sup> de argila. Os horizontes 3, 4, 6, 7 apresentam variações de textura franca (franco-argiloarenosa, franco-argilosa), com máximo de argila de 392 g kg<sup>-1</sup>, enquanto os

horizontes mais profundos voltam a ter mais argila, apresentando textura argila ou muito argilosa e valores de argila entre 431 e 775 g kg<sup>-1</sup>.

No perfil 3 não há uma relação direta entre as estruturas em blocos e a fração dominante no solo, como ocorreu no perfil 1. Assim, por exemplo, blocos ocorrem em horizontes onde o conteúdo de argila é superior em relação às demais frações (hor.2 e 10), bem como onde a areia total é predominante (hor.1, 3, 4, 5 e 6). O único tipo de estrutura que permite uma relação direta com a fração predominante, é a estrutura do tipo granular. Nos dois horizontes onde foi descrita a presença de estrutura granular em campo (hor.1 e 5) há predomínio da fração areia, seguindo pela argila e silte.

O horizonte 5, do perfil 3, onde a areia total é a fração predominante, com estrutura em blocos subangulares associadas à estruturas granulares, apresentou o menor valor de condutividade hidráulica, apenas 0,01 cm h<sup>-1</sup> e infiltração de 0,06 cm h<sup>-1</sup>. Já o maior valor de condutividade hidráulica (2,47 cm h<sup>-1</sup>) e infiltração (10,15 cm h<sup>-1</sup>) ocorrem em horizonte de estrutura em blocos, o horizonte 3, que também contém areia total como predominante entre as três frações do solo.

Considerando o valor de areia total os dados deixam evidente que o conteúdo varia dentro dos perfis, sendo em alguns casos a fração predominante dentro de certos horizontes. A partir da areia total foi obtido o fracionamento em 5 intervalos de tamanhos (areia muito fina, areia fina, areia média, areia grossa e areia muito grossa) que podem ser analisados em relação ao teor de argila e silte (**Tabela 16**).

Dos 9 horizontes identificados no perfil 1, seis deles apresentaram, na fração areia, o predomínio de areia muito fina (hor.1, 2, 3, 7, 8 e 9). A areia fina prevalece em dois horizontes (hor. 6 e 9), enquanto que areia muito grossa foi predominante apenas no horizonte 4 e areia grossa somente no horizonte 5. O horizonte 1, de estrutura em blocos e grumos, que apresenta a maior condutividade hidráulica (5,30 cm h<sup>-1</sup>) e maior infiltração (28,47 cm h<sup>-1</sup>) no perfil, apresenta predomínio de areia muito fina. Já o horizonte 6, de menor condutividade hidráulica (0,24 cm h<sup>-1</sup>), menor infiltração (0,69) e de característica maciça, apresenta equivalência entre o conteúdo de areia fina e areia grossa.

Dos horizontes do perfil 2, quatro deles apresentaram, na fração areia, o predomínio de areia muito grossa (hor.4, 5, 6 e 7). Outros dois horizontes apresentaram o predomínio da fração areia média (hor. 2 e 3). Além disso, dois horizontes apresentaram predomínio da fração areia muito fina (hor. 1 e 8), e em apenas um dos horizontes houve o predomínio de areia fina (hor. 9). Em nenhum dos horizontes houve predomínio de areia grossa. Em relação aos horizontes

com predomínio de areia muito grossa, pode se observar que o horizonte 4 possui característica de grão solto, enquanto os horizontes 5, 6 e 7 apresentam característica maciça.

Diferente do perfil 1, onde a areia muito fina foi a predominante em seis horizontes, no perfil 3 essa fração foi dominante apenas nos horizontes 3, 4 e 6. O predomínio, dentro da fração areia, foi de areia fina, a qual foi encontrada em maior conteúdo em 4 horizontes (hor.7, 8, 9 e 10). Areia muito grossa prevaleceu dentro da fração total apenas no primeiro horizonte.

No horizonte 3 há similar valor para areia muito grossa e muito fina. No horizonte 3, onde foi mensurado o maior valor de condutividade hidráulica (2,47 cm h<sup>-1</sup>) e infiltração (10,15 cm h<sup>-1</sup>) em meio a estrutura em blocos, predominou areia muito fina. Já no horizonte 8, de característica maciça, os valores de condutividade hidráulica (0,13 cm h<sup>-1</sup>) e infiltração (0,52 cm h<sup>-1</sup>) foram os menores entre todos os horizontes do perfil 3, apesar do predomínio de areia muito grossa. Contudo, no horizonte 8 do perfil 3, o conteúdo de areia foi bem distante do valor de argila, fração que dominou no horizonte.

**Tabela 16:** Resultado do fracionamento da areia total

Perfil	Hor.	Argila	Silte	Areia muito fina	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Areia muito grossa
		< 0,002	0,053-0,00	0,125-0,053	0,25-0,125	0,5-0,25	1-0,5	2-1
		g kg <sup>-1</sup>						
1	1	546	100	90	77	63	57	57
	2	580	107	78	65	56	56	57
	3	637	138	53	45	35	50	35
	4	658	146	33	39	31	49	44
	5	618	153	36	34	44	50	56
	6	152	362	91	97	90	97	86
	7	350	234	99	83	88	78	67
	8	356	198	109	106	66	61	96
	9	363	214	95	97	88	72	64
2	1	507	135	88	75	58	60	69
	2	481	135	51	92	103	86	52
	3	192	180	74	142	171	153	88
	4	557	112	82	33	56	71	90
	5	303	125	105	100	124	105	131
	6	249	86	108	106	148	142	154
	7	385	162	112	32	39	124	140
	8	133	214	148	109	122	144	123
	9	363	260	86	97	65	65	59
3	1	326	110	108	107	105	121	118
	2	626	123	56	49	53	35	56
	3	243	242	130	124	97	72	90
	4	392	178	122	99	71	38	97
	5	364	127	102	108	95	105	88
	6	303	135	130	127	104	98	100
	7	274	137	114	124	95	116	131
	8	431	143	91	80	59	89	98
	9	462	155	73	72	50	91	96
	10	775	114	12	12	18	15	45

Hor.: horizonte; Elaborado pela autora.

### 5.5.7 – Argila dispersa em água e grau de floculação

Os valores de argila dispersa em água (**Tabela 17**) demonstram variação em relação aos valores de argila total obtidos com dispersante, o que pode estar relacionado à natureza dos argilominerais (**Figura 35**). No perfil 1 há horizontes com conteúdo elevado de argila em solução química ( $> 600 \text{ g kg}^{-1}$ ), mas amostras desses mesmos horizontes quando dispersas em água apresentaram valor de  $0 \text{ g kg}^{-1}$  (hor.3 e 5). No perfil 2, também houve discrepância nos valores de argila dispersa em solução química e em água, como no caso do horizonte 7, onde em solução dispersante foi obtido  $385 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e  $5 \text{ g kg}^{-1}$  em dispersão em água. No perfil 3 a diferença em  $\text{g kg}^{-1}$  do conteúdo de argila em dispersante químico e em água foi menor do que nos demais, fato atestado pelo desvio padrão de 83,9 contra 160,45 dos perfis 1 e 2.

A princípio não foi encontrada relação direta entre o conteúdo de argila dispersa em água e o tipo de estrutura das amostras.

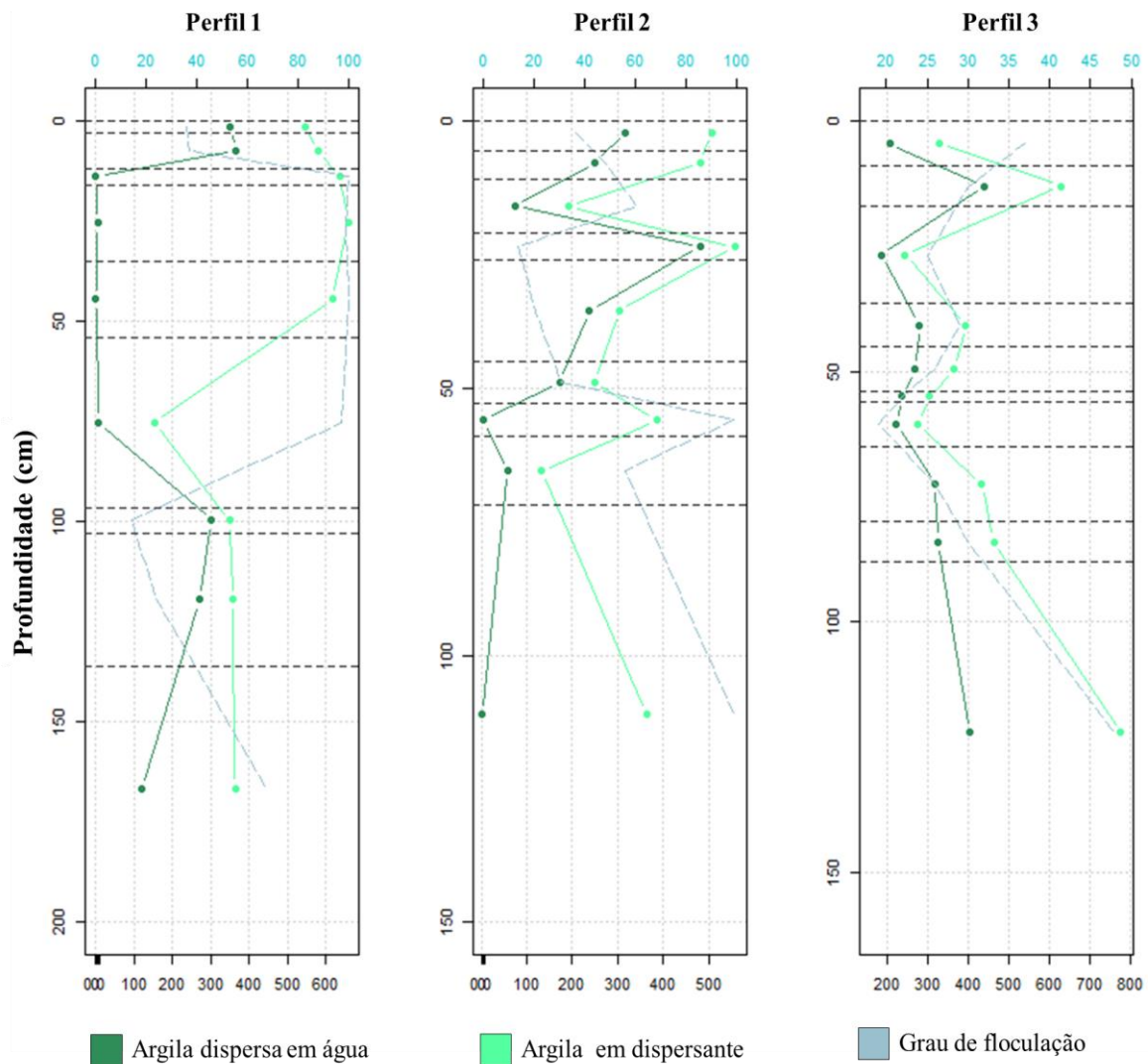
**Tabela 17:** Resultado das análises de argila dispersa em água

Perfil	Hor.	Espessura (cm)	Argila total ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Argila dispersa ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Grau de floculação
1	1	3,0	546	351	36
	2	9,0	580	365	37
	3	4,0	637	0	100
	4	19,0	658	4	99
	5	19,0	618	0	100
	6	42,5	152	5	97
	7	6,5	350	302	14
	8	33,0	356	271	24
	9	61,0	363	119	67
2	1	5,5	507	317	37
	2	5,5	481	251	14
	3	10,0	192	74	21
	4	5,0	557	481	31
	5	19,0	303	238	99
	6	8,0	249	173	56
	7	6,0	385	5	99
	8	13,0	133	59	37
	9	78,0	363	2	30
3	1	9,0	326	204	25
	2	8,0	626	437	29
	3	19,5	243	183	26
	4	8,5	392	278	22
	5	9,0	364	268	19
	6	2,0	303	235	26
	7	9,0	274	221	30
	8	15,0	431	317	48
	9	8,0	462	323	36
	10	68,0	775	403	37
		<b>Perfil 1</b>	<b>Perfil 2</b>	<b>Perfil 3</b>	
Média ( $\text{g kg}^{-1}$ )		157,44	177,77	286,9	
Desvio padrão		162,85	160,45	83,90	
CV		103	90	29	

Hor.: horizonte; CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

Quanto ao grau de flocculação, os dados indicam que no perfil 1, o maior valor está nos horizontes 3 e 5, ambos com 100% e com estrutura em blocos. Esse resultado está associado ao fato da argila dispersa em água nesses dois horizontes ser de 0 g kg<sup>-1</sup>. Além do horizonte 3, o horizonte 4, de característica maciça, também apresenta alta quantidade de argila e alto valor de grau de flocculação, 99,4%, respectivamente. O menor grau de flocculação do perfil 1 (13,7%) foi identificado no horizonte 7, o qual foi descrito como de estrutura maciça.

**Figura 35:** Argila dispersa em água e em dispersante, e o grau de flocculação



A imagem mostra variação, em profundidade, do conteúdo de argila dispersa em água, em dispersante e o grau de flocculação nos três perfis de solos analisados. Elaborado pela autora.

No perfil 2, o valor mais elevado de grau de flocculação foi encontrado no horizonte 7 (99%), argiloarenoso e de característica maciça. Também descrito como maciço, o horizonte 4, dentre todos os demais do perfil, apresentou o menor grau de flocculação (14%). Merece ser

destacado que o horizonte 4 é o de maior conteúdo de argila, tanto na condição de dispersão com solução química, quanto em água, respectivamente  $557 \text{ g kg}^{-1}$  e  $481 \text{ g kg}^{-1}$ .

No perfil 3, o maior grau de floculação foi identificado no horizonte 10 (48%), o qual é descrito como de estrutura em blocos e predomínio da fração argila ( $775 \text{ g kg}^{-1}$ ). Estrutura maciça também caracteriza o horizonte 7, o qual apresentou o menor grau de floculação (19,7%), mas diferente do horizonte 10, apresentou predomínio de areia ( $580 \text{ g kg}^{-1}$ ).

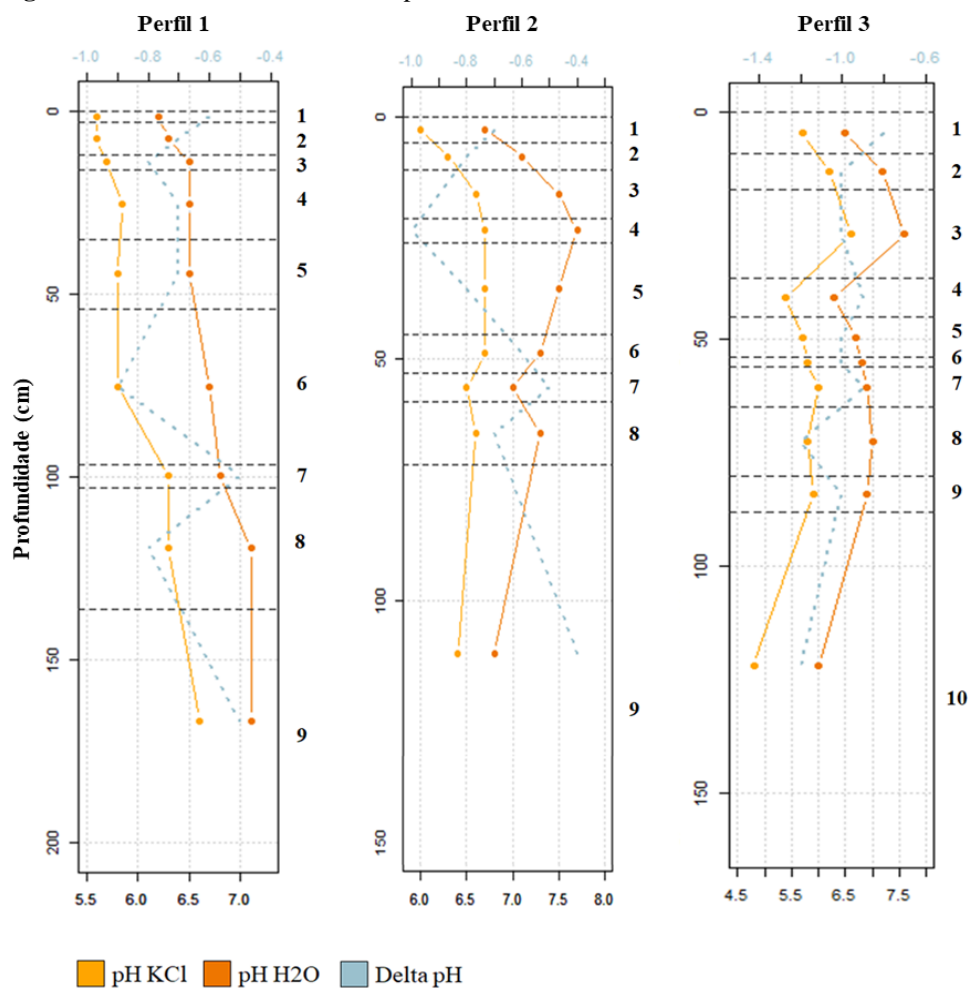
## 5.6 – Análises químicas

### 5.6.1 - Análises químicas de rotina

#### 5.6.1.1 – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ e $\text{pH}_{\text{KCl}}$

Os três perfis de solo analisados possuem  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  entre 6,0 e 7,7, ou seja, neutros a ligeiramente alcalinos (SANTOS *et al.*, 2018). Nos três perfis os horizontes superficiais, mais escuros, apresentam valores inferiores a 7 (**Figura 36**).

**Figura 36:** Resultado das análises de pH



Os gráficos mostram no eixo x inferior a variação dos valores de pH e no eixo x superior o do delta pH. Elaborado pela autora.

Observando a análise descritiva dos dados (**Tabela 18**), fica claro que o perfil 1 é o que apresenta menor diferença entre o valor máximo e mínimo de pH em água (0,9). No perfil 2 a diferença entre o maior e o menor pH foi de 1 unidade, enquanto o perfil 3 tem 1,6 unidades, maior valor comparando os três perfis.

**Tabela 18:** Resultado das análises de pH

	Perfil 1		Perfil 2		Perfil 3	
	pH <sub>KCl</sub>	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	pH <sub>H2O</sub>
Máximo	6,6	7,1	6,7	7,7	6,6	7,6
Mínimo	5,6	6,2	6,0	6,7	4,8	6,0
Média	5,95	6,63	6,5	7,2	5,7	6,79
Desvio padrão	0,35	0,32	0,23	0,33	0,47	0,45
CV	6	5	4	5	8	7

CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

No perfil 1, os valores de pH indicam que o solo possui caráter mais acidificado nos horizontes superficiais do que em profundidade. Quanto menor a proximidade com a superfície, maiores são os valores de pH. A média dos valores é de 6,6 para pH<sub>H2O</sub> e 5,9 para pH<sub>KCl</sub> e desvio padrão de 0,32 para pH<sub>H2O</sub> e 0,35 para pH<sub>KCl</sub>. O horizonte 1 apresentou o menor valor de pH<sub>H2O</sub> (6,2) e os horizontes 8 e 9, que apresentaram pH<sub>H2O</sub> 7, maior valor no perfil.

Assim como no perfil 1, o perfil 2 tem menor valor de pH<sub>H2O</sub> em seu primeiro horizonte (6,7). O segundo menor valor de pH<sub>H2O</sub> do perfil é o horizonte 10 (6,8), o qual apresenta cores escuras. Os valores mais elevados de pH no perfil 2 condizem com as observações de campo, em relação à presença de materiais ricos em carbonatos ao longo do perfil, incluindo cerâmicas e pedaços de cimento.

Os dados do perfil 3 mostram que o pH do solo confere a ele mais acidez do que os demais perfis, com média de 6,79 pH<sub>H2O</sub> e 5,7 pH<sub>KCl</sub>. Diferentemente do que foi identificado nos outros dois perfis, o perfil 3 apresentou o menor valor de pH<sub>H2O</sub> no horizonte 10 (6,3), situado em ambiente redutor e de coloração acinzentada, sendo que o horizonte 1 é o de segundo menor valor (6,5).

### 5.6.1.2 – Cátions trocáveis e CTC

Em profundidade, os dados químicos são heterogêneos, com grandes variações entre alguns horizontes sequenciais (**Tabela 19**). A CTC varia de 41 a 142,8 mmolc kg<sup>-1</sup> no Perfil 1, 90,5 a 293,55 mmolc kg<sup>-1</sup> no Perfil 2 e 44,9 a 194,45 mmolc kg<sup>-1</sup> no Perfil 3. A grande maioria dos valores está entre 50 e 150 mmolc kg<sup>-1</sup>, o que caracteriza uma CTC mediana nos perfis estudados, segundo Embrapa (2015). Nos três perfis, os maiores valores de CTC são



encontrados nos últimos 2 horizontes. Todos os horizontes são eutróficos, com valores de 52 a 95% no P1, 76 a 98% no Perfil 2 e 71 a 100% no Perfil 3. O horizonte superficial (1) tem os menores valores de V% em todos os perfis. A saturação em  $Al^{3+}$  (m%) é zero em praticamente todos os horizontes analisados, com exceção do horizonte 9 do Perfil 3, que apresenta m de 1%

Os cátions trocáveis mais abundantes no complexo de troca são  $Ca^{2+}$  e  $H^+$  nos Perfis 1 e 3 e  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  no perfil 2. Nos 3 perfis os valores de  $Ca^{2+}$  são majoritariamente superiores a  $30 \text{ mmolc kg}^{-1}$  e, portanto, considerados altos pelos parâmetros de Santos *et al.* (2018). Ressalta-se que os últimos 3 horizontes de todos os perfis possuem os maiores valores de  $Ca^{2+}$ . No perfil 1, o valor médio de  $Ca^{2+}$  foi de  $46,89 \text{ mmol kg}^{-1}$ . O valor mais elevado foi de  $114 \text{ mmol kg}^{-1}$ , no horizonte 9 (136-197 cm), e o menor valor foi de  $16,00 \text{ (mmol kg}^{-1})$  no horizonte 6 (54-96,5 cm). Os horizontes superficiais 1 a 5 apresentam valores de  $Ca^{2+}$  muito próximos ou até menores aos de  $H^+$ , mas nos demais horizontes o  $Ca^{2+}$  é consideravelmente mais alto.

No perfil 2, o valor médio de  $Ca^{2+}$  foi  $118,4 \text{ mmol kg}^{-1}$ . O valor mais elevado ( $235,5 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) foi encontrado no horizonte 9 (72-150 cm) e o menor valor ( $37,00 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) no horizonte 6 (45-53 cm). Os valores de  $Mg^{2+}$ , o segundo cátion mais abundante, são significativamente menores que os de  $Ca^{2+}$ , variando entre 3 (horizonte 6) e  $35,5 \text{ (mmolc kg}^{-1})$ , sendo considerados, entretanto, baixos a altos segundo os parâmetros de fertilidade de Embrapa (2015).

Por fim, no perfil 3 o valor médio de  $Ca^{2+}$  foi de  $83,25 \text{ mmol kg}^{-1}$ , o menor entre os três perfis, mas ainda alto, segundo Embrapa (2015). O valor mais elevado de cálcio ( $145,5 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) foi encontrado no horizonte 10 (88-156 cm) e o menor valor foi  $38,00 \text{ mmol kg}^{-1}$  no horizonte 7 (56-65 cm). Os teores de  $H^+$ , segundo cátion mais abundante, são bem menores que os de  $Ca^{2+}$ , variando de  $<0,4$  a  $36,5 \text{ mmolc kg}^{-1}$ .

Os valores de  $K^+$  e  $Na^+$  são baixos nos 3 perfis, sendo, respectivamente, menores que 3 e  $1,3 \text{ momlc kg}^{-1}$ . Já o fósforo tem alta variação nos perfis, havendo geralmente grande desvio padrão. No Perfil 1, os horizontes 1 (0-5,5 cm) e 2 (5,5-11 cm) pouco variaram ( $4 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mas em subsuperfície os teores de P alcançaram  $33,1 \text{ mg kg}^{-1}$  no horizonte 9 (136-197 cm). No Perfil 2, a concentração de fósforo no horizonte 7 (53-59 cm) foi de  $28,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , a maior do perfil, enquanto que o horizonte 4 (21-26 cm) apresentou a menor ( $4,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Por fim, no perfil 3, os dados relativos ao fósforo apresentam desvio padrão de 4,13 devido a discrepância entre os valores dos horizontes. A concentração de fósforo no horizonte 4 (36,5-45 cm) foi de  $18,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , a maior do perfil, enquanto que no horizonte 2 (9-17 cm) apresentou a menor ( $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

**Tabela 19:** Características químicas dos solos coletados no Parque Villa-Lobos

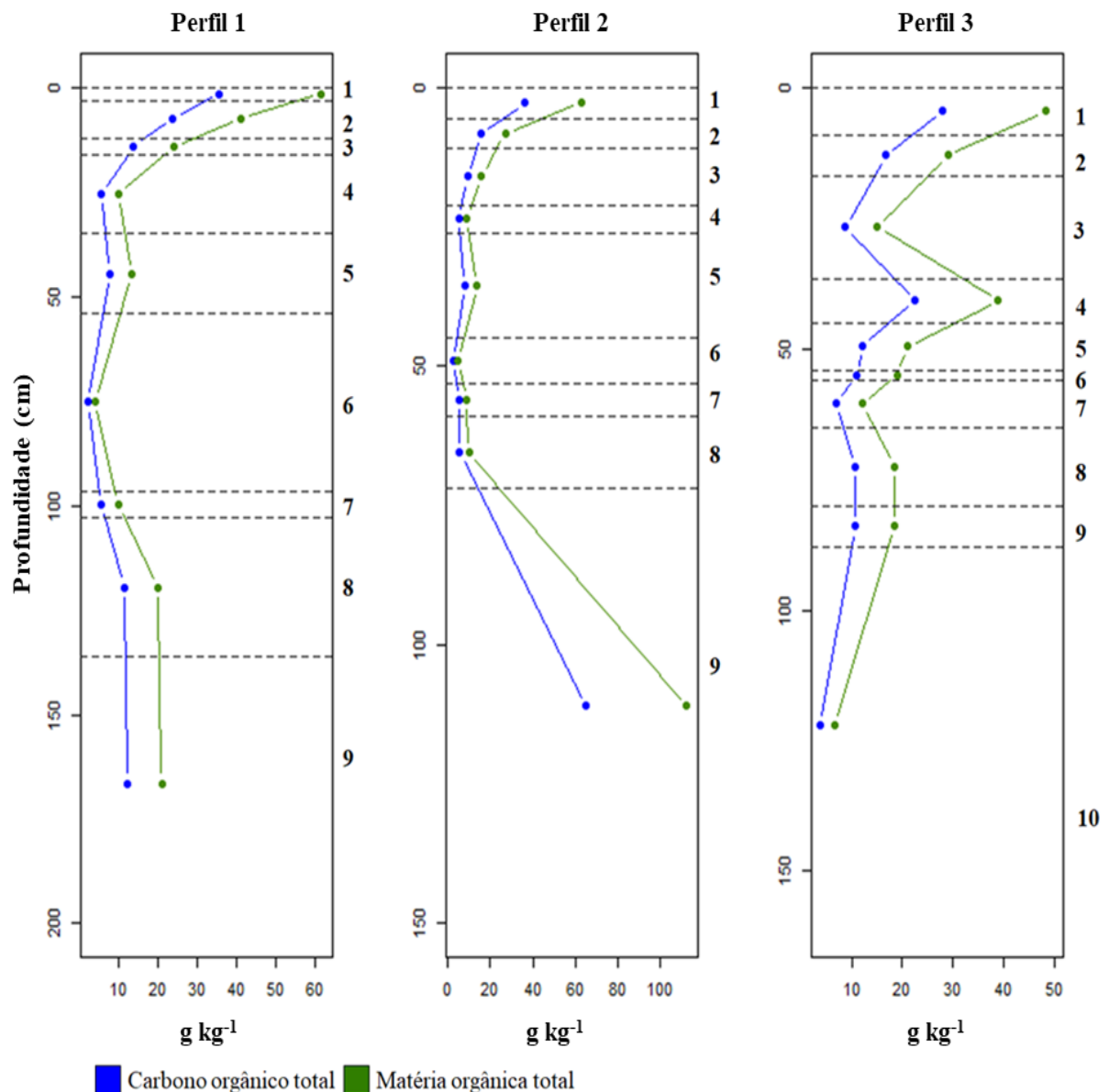
Perfil	Hoz.	Estr	Prof. (cm)	P	K	Ca	Mg	Na	H+Al	Al	SB	CTC	V	m	P	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	
				mg kg <sup>-1</sup>				mmolc kg <sup>-1</sup>				%										
1	1	Gr. e bl.	0-3	4	1,9	46	10,5	<0,4	53	<0,02	58,45	111,45	52	0,0	Máximo	33,10	2,50	114,0	18,00	135,8	142,80	95,00
	2	Gr. e bl.	13-12	3	2,5	42	6	<0,4	40	<0,02	50,5	90,5	56	0,0								
	3	Bl. e la.	12-16	<2	1,4	27	4	<0,4	26	<0,02	32,4	58,4	55	0,0								
	4	ma	16-35	<2	0,5	19	2	<0,4	19,5	<0,02	21,5	41	52	0,0	Mínimo	3,00	0,50	16,00	2,00	18,60	29,60	52,00
	5	ma. e bl.	35-54	<2	0,7	22,5	3	<0,4	22	<0,02	26,2	48,2	54	0,0								
	6	ma	54-96,5	3,6	0,6	16	2	<0,4	11	<0,02	18,6	29,6	63	0,0								
	7	ma	96,5-103	5,5	1,2	50,5	4	<0,4	9	<0,02	55,7	64,7	86	0,0	Média	13,66	1,54	46,89	6,94	55,60	77,43	67,32
	8	ma	103-136	33,1	2,5	85	13	0,7	9	<0,02	101,2	110,2	92	0,0								
	9	ma	136-197	32,8	2,5	114	18	1,3	7	<0,02	135,8	142,8	95	0,0								
2	1	Gr. e bl.	0-5,5	11,3	3,4	109	15	<0,4	41	<0,02	127,4	168,4	76	0,0	Máximo	28,5	3,90	235,50	35,50	273,55	293,55	98,00
	2	Gr. e bl.	5,5-11	13,2	1,4	101	8	0,4	11	<0,02	110,8	121,8	91	0,0								
	3	gs.	11-21	<2	3,9	85	8	0,9	4	<0,02	97,8	101,8	96	0,0								
	4	ma.	21-26	4,5	2,1	94	7	0,5	5	<0,02	103,6	108,6	95	0,0	Mínimo	4,50	0,75	37,00	3,00	40,75	46,25	76,00
	5	ma.	26-45	9,2	2,1	73	9	0,4	6	<0,02	84,5	90,5	93	0,0								
	6	ma.	45-53	6,05	0,75	37	3	<0,4	5,5	<0,02	40,75	46,25	88	0,0								
	7	ma.	53-59	28,5	1,8	148	8	<0,4	7	<0,02	157,8	164,8	96	0,0	Média	11,22	2,11	118,40	13,06	133,97	145,41	91,78
	8	gs.	59-72	<2	1,8	183	24	0,7	3,5	<0,02	209,5	213	98	0,0								
	9	ma.	72-150	5,8	1,75	235,5	35,5	0,8	20	<0,02	273,55	293,55	93	0,0								
3	1	Gr. e bl.	0-9	8	2,45	75,5	12	<0,4	36,5	<0,02	89,95	126,45	71	0,0	Maximo	18,50	2,45	145,50	47,50	194,45	225,95	100,00
	2	bl.	9-17	2,5	1,7	63	7	<0,4	19	<0,02	71,7	90,7	79	0,0								
	3	bl.	17-36,5	8,3	2,4	79	6	0,4	<0,4	<0,02	87,8	87,8	100	0,0								
	4	bl.	36,5-45	18,5	1,5	84	12	<0,4	15	<0,02	97,5	112,5	87	0,0	Mínimo	2,50	0,90	38,00	6,00	44,90	53,90	71,00
	5	gr. e bl.	45-54	9,6	1,3	70	12	<0,4	17	<0,02	83,3	100,3	83	0,0								
	6	bl.	54-56	10	1,25	62	9	<0,4	15	<0,02	72,25	87,25	83	0,0								
	7	ma.	56-65	9,6	0,9	38	6	<0,4	9	<0,02	44,9	53,9	83	0,0	Média	8,93	1,59	83,25	14,25	99,14	117,33	84,5
	8	ma.	65-80	10,25	1,45	105	15	<0,4	21	<0,02	121,45	142,45	85	0,0								
	9	ma.	80-88	7,2	1,55	110,5	16	<0,4	18	<0,02	128,05	146,05	88	0,0								
	10	bl.	88-156	5,35	1,45	145,5	47,5	<0,4	31,5	1	194,45	225,95	86	1,0	DP	4,13	0,48	30,28	12,20	41,23	47,32	7,30
CV	46	30	36	86	42	27	9															

Estr.: estruturas; la: laminar; gr: granulares; bl: blocos; ma: maciça; gs: grãos soltos. CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

### 5.6.1.3 – Carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono

Os dados obtidos para carbono orgânico total demonstram que os 3 perfis possuem tendência de acúmulo de carbono nos horizontes superficiais. Entretanto, os perfis 2 e 3 apresentam altos valores de COT também em horizontes subsuperficiais, como o 9 no P2 e o 4 no P3 (**Figura 37**).

**Figura 37:** Carbono orgânico total e matéria orgânica total



Com exceção do perfil 2, nota-se a tendência de diminuição, em profundidade, da concentração de carbono e matéria orgânica. Elaborado pela autora.

Os dados descritivos demonstram que os valores mínimos e máximos estão bem distantes entre si nos três perfis (**Tabela 20**). No perfil 1, o valor máximo de COT (35,7 g kg<sup>-1</sup>

<sup>1)</sup> no horizonte 1 (0-3 cm) contrasta com o menor valor de 2,3 g kg<sup>-1</sup> do horizonte 6. Os valores máximos e mínimos refletem em um alto desvio padrão (10,48). A associação entre blocos e grumos com textura argilosa é característica do horizonte 1, enquanto que no horizonte 6 é maciço de textura argilosa.

O perfil 2, o valor mínimo de COT (2,9 g kg<sup>-1</sup>) é encontrado no horizonte 6 e o valor máximo (65 g kg<sup>-1</sup>) no horizonte 9, o qual em campo apresentou a coloração mais escura de todos os horizontes descritos (preto-10YR 2/1), o maior delta pH. O horizonte 6 foi descrito em campo como maciço, assim como o horizonte 9, porém, no caso do horizonte 9 o MLT e a micromorfologia apontaram a existência de blocos.

Já no perfil 3, o valor máximo de COT (28,1 g kg<sup>-1</sup>) foi identificado no primeiro horizonte e o menor (3,8 g kg<sup>-1</sup>) no décimo horizonte, sendo possível notar que ambos possuem a presença de estruturas em blocos. O horizonte de maior conteúdo de carbono coincide com o maior delta pH do perfil 3.

**Tabela 20:** Resultado das análises de carbono orgânico total e matéria orgânica total

	Perfil 1		Perfil 2		Perfil 3	
	COT	MOT	COT	MOT	COT	MOT
Máximo (g kg <sup>-1</sup> )	35,7	61,5	65,00	112,00	28,10	48,50
Mínimo (g kg <sup>-1</sup> )	2,3	4,00	2,90	5,00	3,80	6,50
Média (g kg <sup>-1</sup> )	13,21	22,78	17,08	29,44	13,16	22,70
Desvio padrão	10,48	18,05	20,69	35,66	7,36	12,73
CV	79	79	121	121	56	56

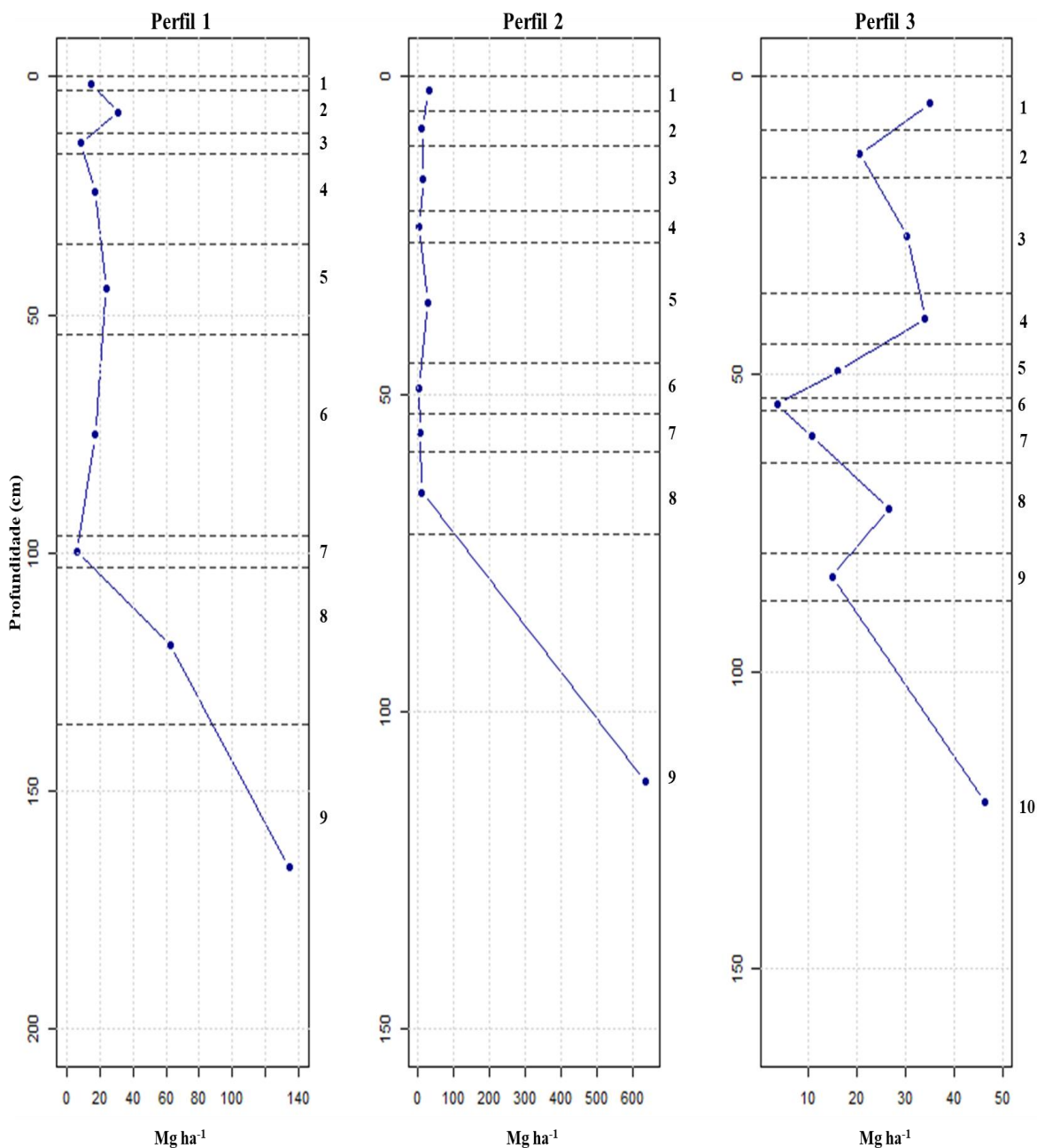
CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

Os valores referentes ao estoque de carbono demonstram que os horizontes com maiores valores de cada perfil são subsuperficiais e possuem características típicas das 3 zonas de depósitos existentes antes da implementação do parque. É notório que os valores apresentaram grande amplitude, fato visível graficamente (**Figura 38**) e pelo desvio padrão (**Tabela 21**).

No perfil 1 percebe-se o aumento do estoque de carbono em profundidade, com valor máximo de 134,0 mg ha<sup>-1</sup> no horizonte 9, o qual foi descrito como de maior conteúdo de carbono orgânico, maciço e de menor porosidade. No perfil 2, o horizonte com maior estoque de carbono é o horizonte 9 (634,2 mg ha<sup>-1</sup>), o mesmo de maior conteúdo de carbono, estrutura maciça em campo, mas com blocos de acordo com o MLT e micromorfologia, e o maior valor de porosidade. O horizonte 6 do perfil 2 apresentou o menor estoque de carbono (4,2 mg ha<sup>-1</sup>) e menor porosidade. O valor máximo do estoque de carbono no perfil 2 fez com que o desvio padrão dos dados nesse solo fosse de 195,2 mg ha<sup>-1</sup>, o maior dentre os três perfis estudados. No

perfil 3, o horizonte de maior estoque de carbono foi o horizonte 10 com 46,3 mg ha<sup>-1</sup>, o mesmo que apresentou a menor porosidade e característica estrutural em blocos.

**Figura 38:** Estoque de carbono orgânico



Nota-se, nos três perfis, a tendência de aumento do estoque de carbono em profundidade. Elaborado pela autora.

Assim, os dados sugerem que quanto menos poroso um horizonte maior é o estoque de carbono. A porosidade é característica que não foi utilizada diretamente para o cálculo do estoque de carbono, porém está associada a densidade do solo, ou seja, amostras mais densas tendem a possuir menor valor de porosidade total do que amostras menos densas.

**Tabela 21:** Estoque de carbono

Perfil	Hor.	Espessura (cm)	Estoque de carbono (mg ha <sup>-1</sup> )	Estruturas campo	Estruturas MLT	Estrutura micromorfologia
1	1	3,0	14,6	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Granular e blocos
	2	9,0	31,4	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Granular e blocos
	3	4,0	8,6	Blocos e laminar		
	4	19,0	17,2	Maciça	Blocos	Maciça e blocos
	5	19,0	24,1	Maciça e blocos		
	6	42,5	17,4	Maciça		
	7	6,5	6,1	Maciça		
	8	33,0	62,3	Maciça		
	9	61,0	134,0	Maciça		
2	1	5,5	30,3	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Blocos
	2	5,5	12,1	Granulares e blocos	Blocos	Blocos
	3	10,0	14,8	Grãos soltos		
	4	5,0	3,9	Maciça		
	5	19,0	26,7	Maciça		
	6	8,0	4,2	Maciça		
	7	6,0	5,9	Maciça		
	8	13,0	12,1	Grãos soltos		
	9	78,0	634,2	Maciça	Blocos	Blocos
3	1	9,0	35,0	Granulares e blocos	Granulares	
	2	8,0	20,6	Blocos	Blocos	Blocos
	3	19,5	30,4	Blocos		
	4	8,5	34,1	Blocos	Blocos	Blocos
	5	9,0	16,1	Granulares e blocos	Granulares e blocos	Blocos
	6	2,0	3,5	Blocos		Blocos
	7	9,0	10,8	Maciça		
	8	15,0	26,7	Maciça		
	9	8,0	14,9	Maciça		
	10	68,0	46,3	Blocos	Blocos	
		<b>Perfil 1</b>	<b>Perfil 2</b>	<b>Perfil 3</b>		
Média (Mg ha <sup>-1</sup> )		35,1	82,7	23,8		
Desvio padrão		40,7	195,2	13,0		
CV		116	2	55		

Hor.: horizonte; CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

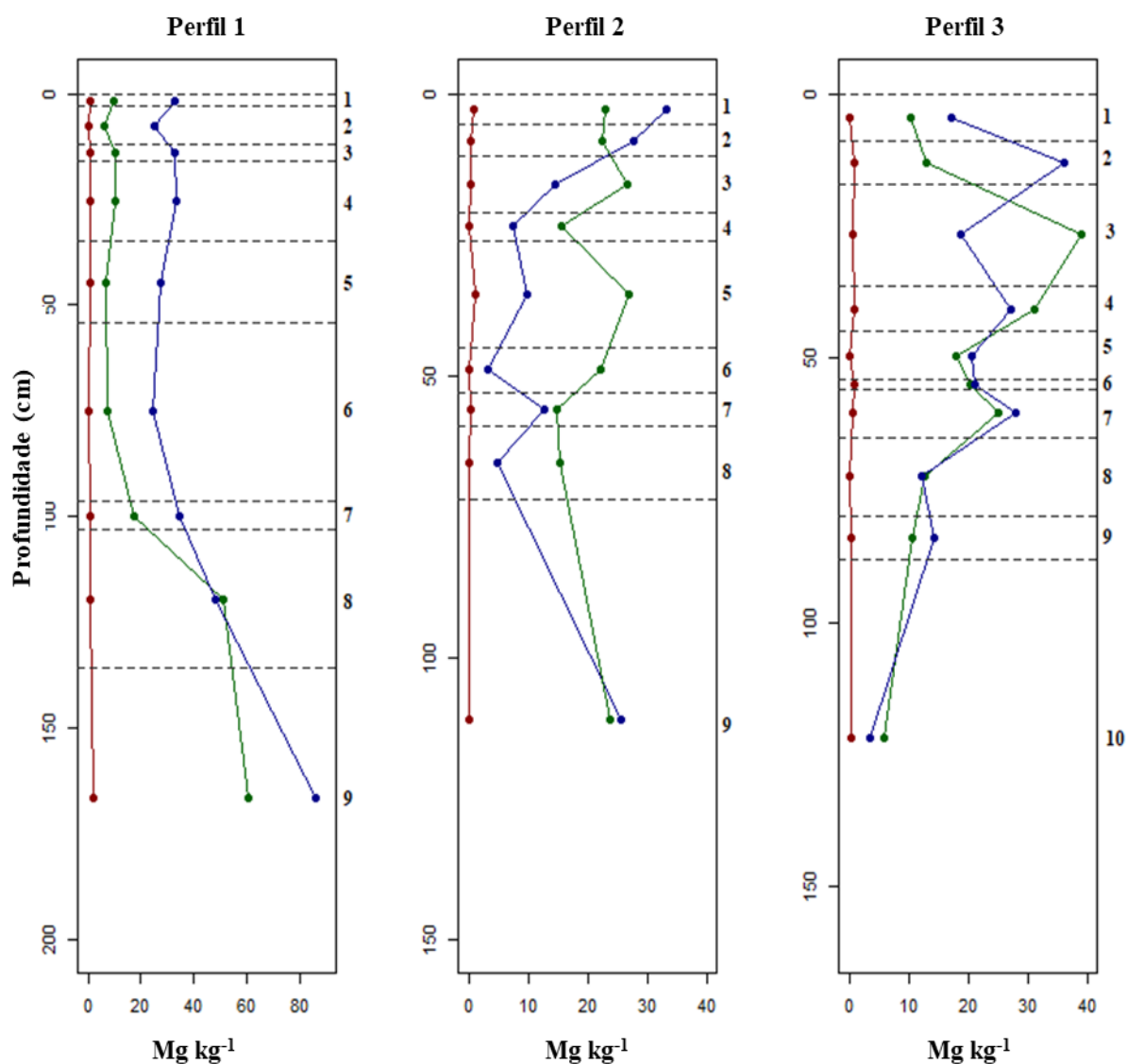
### 5.6.2 – Teores totais de chumbo, cádmio e cromo

Os teores de metais potencialmente tóxicos apresentaram variabilidade em profundidade (**Figura 39**), mas sem ultrapassar os valores de referências para as três classes de uso da terra consideradas pela CONAMA e pela CETESB (**Tabela 22**).

Os resultados demonstram que no perfil 1, os maiores valores de Pb (51,3 e 60,7 mg kg<sup>-1</sup>) estão nos horizontes 8 e 9, ambos de textura franco argilosa (356 g kg<sup>-1</sup> e 363 g kg<sup>-1</sup>), os mesmos que apresentam os maiores valores de fósforo (33,1 e 32,8 mg kg<sup>-1</sup>) e V% (92 e 95%). O menor valor de Pb (6 mg kg<sup>-1</sup>) foi encontrado no horizonte 2, que também apresenta baixos valores de fósforo (3 g kg<sup>-1</sup>) e V% (56%). Em relação aos valores de Cd e Cr total, as maiores concentrações também foram identificadas nos horizontes 8 e 9, enquanto os menores valores

estão no horizonte 6, com 0,3 e 24,6 mg kg<sup>-1</sup>. Esse horizonte apresenta textura franca e o menor valor de COT (2,3 g kg<sup>-1</sup>) do perfil.

**Figura 39:** Teores de metais potencialmente tóxicos



As linhas azuis representam o comportamento do cromo total, as verdes o chumbo e as vermelhas o cádmio. Elaborado pela autora.

No perfil 2, o maior valor de Pb está no horizonte 5 (27,0 g kg<sup>-1</sup>), de textura franco-argiloarenosa (teor de argila de 303 g kg<sup>-1</sup>) e baixo teor de COT (8,1 g kg<sup>-1</sup>), enquanto o de menor valor foi no horizonte 7 (14,8 mg kg<sup>-1</sup>), de textura argilo-arenosa (argila 385 g kg<sup>-1</sup>) e também com baixos teores de COT (5,2 g kg<sup>-1</sup>). O valor máximo de Cd foi de 1,1 mg kg<sup>-1</sup>, também no horizonte 5 e o mínimo de 0,2 mg g<sup>-1</sup> no horizontes 8, que apresenta textura franco-arenosa (133 g kg<sup>-1</sup>) e baixo COT (5,8), e no 9, com textura franco-argilosa (363 g kg<sup>-1</sup>) e alto

COT (65,0 g kg<sup>-1</sup>). Quantidades de Cd não foram suficientes para serem detectadas em dois dos horizontes, o 4 e o 6. Em relação ao Cr total, os dados apontam maior concentração no horizonte superficial (33,3 mg kg<sup>-1</sup>), textura argila (507 g kg<sup>-1</sup> de argila) e o segundo mais alto teor de COT do perfil (36,5 g kg<sup>-1</sup>), e menor no horizonte 6 (3,4 mg kg<sup>-1</sup>), franco-argiloarenosa e baixos teores de COT (2,9 g kg<sup>-1</sup>)

**Tabela 22:** Resultado das análises de teores de metais potencialmente tóxicos e valores de referência

Perfil	Hor.	Cd	Pb	Cr total	Perfil	Hor.	Cd	Pb	Cr total	Perfil	Hor.	Cd	Pb	Cr total																																		
		mg kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>																																				
1	1	0,7	9,8	33	2	1	1	23	33,3	3	1	0,2	10,4	17,2																																		
	2	0,5	6	24,9		2	0,4	22,4	27,6		2	0,9	13,1	36,1																																		
	3	0,7	10,6	32,6		3	0,4	26,7	14,6		3	0,6	39,1	18,9																																		
	4	1,1	10,4	33,2		4	<0,2	15,6	7,4		4	1,0	31,1	27,3																																		
	5	0,8	6,8	27,7		5	1,1	27,0	9,8		5	0,2	17,9	20,7																																		
	6	0,3	7,5	24,6		6	<0,2	22,2	3,4		6	0,9	20,3	21,1																																		
	7	0,9	17,2	34,5		7	0,4	14,8	12,8		7	0,7	25	28																																		
	8	1,1	51,3	48,4		8	0,2	15,4	4,9		8	0,2	12,6	12,3																																		
	9	1,8	60,7	86,2		9	0,2	23,7	25,5		9	0,5	10,7	14,3																																		
										10	0,4	6,0	3,6																																			
Média		0,8	10,4	33,0			0,4	22,4	12,8			0,6	15,5	19,8																																		
DP		0,4	20,8	19,3			0,4	4,8	10,8			0,3	10,4	9,1																																		
CV		54	200	59			92	21	84			56	67	46																																		
<b>Valores de referência (mg kg<sup>-1</sup>)</b>																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">CONAMA 2009</th> <th colspan="3">CETESB 2014</th> </tr> <tr> <th>Cd</th> <th>Pd</th> <th>Cr total</th> <th>Cd</th> <th>Pd</th> <th>Cr total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Agrícola</td> <td>3</td> <td>180</td> <td>150</td> <td>3,6</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Residencial</td> <td>8</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>14</td> <td>240</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>Industrial</td> <td>20</td> <td>900</td> <td>400</td> <td>160</td> <td>4400</td> <td>400</td> </tr> </tbody> </table>																CONAMA 2009			CETESB 2014			Cd	Pd	Cr total	Cd	Pd	Cr total	Agrícola	3	180	150	3,6	150	150	Residencial	8	300	300	14	240	300	Industrial	20	900	400	160	4400	400
	CONAMA 2009			CETESB 2014																																												
	Cd	Pd	Cr total	Cd	Pd	Cr total																																										
Agrícola	3	180	150	3,6	150	150																																										
Residencial	8	300	300	14	240	300																																										
Industrial	20	900	400	160	4400	400																																										

Hor. horizonte; Cd cádmio; Pb chumbo; Cr total cromo total; CV coeficiente de variação. Elaborado pela autora.

No perfil 3, Pb foi detectado em maior quantidade (39,1 mg kg<sup>-1</sup>) no horizonte 3, franco-argiloarenoso (teor de argila de 243 g kg<sup>-1</sup>), e em menor no horizonte 10 (6,0 mg kg<sup>-1</sup>), muito argiloso (teor de argila de 775 g kg<sup>-1</sup>). Ambos os horizontes não apresentam grande quantidades de COT (8,7 e 3,8 g kg<sup>-1</sup>).

O Cd apresentou o maior valor no horizonte 4 (de 1 mg kg<sup>-1</sup>), franco-argiloso (392 g kg<sup>-1</sup> de argila) e com altos teores de COT (22,6 g kg<sup>-1</sup>), e menores valores (0,2 mg kg<sup>-1</sup>), no horizonte 1, franco-argiloarenoso (326 g kg<sup>-1</sup> de argila) e com teores de COT relativamente altos em relação aos outros horizontes (28,1 g kg<sup>-1</sup>), horizonte 5, argilo-arenoso (364 g kg<sup>-1</sup>), COT de 12,2 g kg<sup>-1</sup> e horizonte 8, de textura argila (431 g kg<sup>-1</sup> de argila), de COT 10,7 g kg<sup>-1</sup>.

Já o Cr total foi maior (36,1 mg kg<sup>-1</sup>) no horizonte 2, muito argiloso (626 g kg<sup>-1</sup>) e menor no horizonte 10 (3,6 mg kg<sup>-1</sup>), também muito argiloso (775 g kg<sup>-1</sup> de argila), ambos com baixos teores de COT (16,8 e 3,8 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente).



## 5.7 – Separação e análise de microplásticos

### 5.7.1 – Determinação de microplásticos na fração areia muito grossa e areia grossa

Os resultados demonstram que a utilização de solução saturada de cloreto de zinco para separação dos microplásticos é algo eficaz, porém, durante o procedimento, elementos de origem orgânica, como raízes, flutuaram, o que impôs a necessidade de observação em lupa binocular para separação manual dos elementos. Apenas em lupa binocular foi possível a separação dos materiais alongados que por ventura ficam presos em meio aos materiais minerais que compõem o solo, como os grãos de quartzo.

A partir da observação dos microplásticos nas frações areia muito grossa (2-1 mm) e areia grossa (1-0,5 mm) é possível perceber que o predomínio de microplásticos ocorre na fração grossa das areias dos solos e que além disso, a forma alongada (fibras) é a forma predominante (**Tabela 23**).

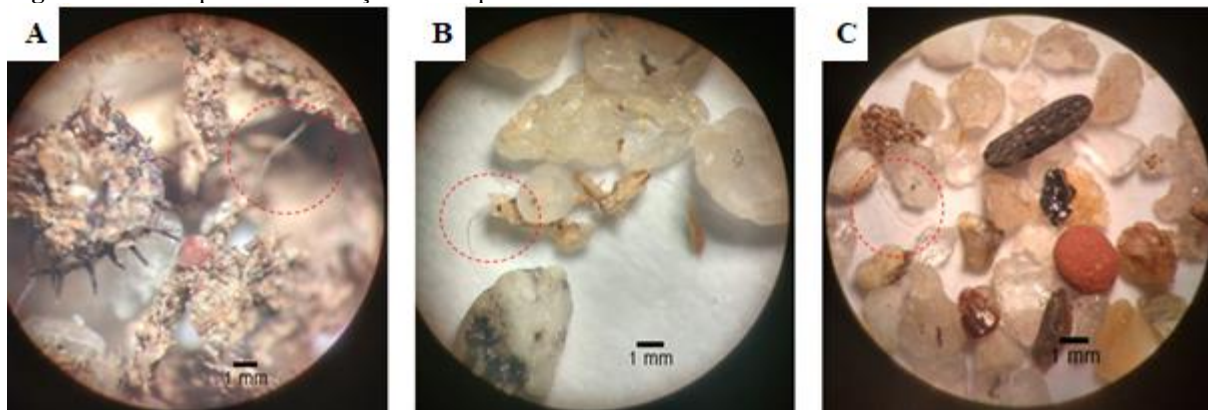
**Tabela 23:** Microplásticos nas frações areia muito grossa (2-1 mm) e areia grossa (1-0,5 mm)

Amostra	Estruturas	Fração		Forma	Degradação	Cores	Quant.
		MG.	G.				
1	1 Granulares e blocos	X	X	Alongada	Não identificado	Azul; Branco	3
	4 Maciça		X	Alongada	Não identificado	Preto	1
	5 Maciça e blocos	X		Alongada	Não identificado	Branco	1
	7 Maciça	X		Alongada	Não identificado	Azul	1
	8 Maciça		X	Alongada	Não identificado	Azul; Branco	3
	9 Maciça	X	X	Alongada	Não identificado	Branco	2
2	1 Granulares e blocos		X	Alongada	Não identificado	Vermelho	1
	2 Granulares e blocos	X		Alongada	Não identificado	Azul	1
	3 Grãos soltos		X	Alongada	Não identificado	Azul	1
	4 Maciça		X	Irregular	Não identificado	Azul; Preto	2
	5 Maciça	X		Alongada	Não identificado	Preto	3
	6 Maciça	X		Alongada	Não identificado	Branco	1
	7 Maciça		X	Alongada	Não identificado	Azul; Preto	2
	8 Grãos soltos	X	X	Alongada	Não identificado	Azul; Branco; Preto	5
	9 Maciça		X	Alongada	Não identificado	Branco; Preto	2
3	1 Granulares e blocos	X	X	Alongada	Não identificado	Azul; Preto	3
	2 Blocos	X	X	Alongada	Não identificado	Azul; Branco	5
	3 Blocos		X	Alongada	Não identificado	Azul; Branco; Vermelho	4
	4 Blocos	X	X	Alongada	Não identificado	Azul; Preto	2
	5 Granulares e blocos		X	Alongada	Não identificado	Azul	1
	6 Blocos	X		Alongada	Não identificado	Azul	2
	7 Maciça	X	X	Alongada	Não identificado	Azul; Branco	3
	8 Maciça	X	X	Alongada	Não identificado	Azul; Branco	5
	9 Maciça	X	X	Alongada	Não identificado	Azul	4
	10 Blocos		X	Alongada	Não identificado	Azul	1

**Hor.:** horizonte; **MG.:** muito grossa; **G.:** grossa; **Indet.:** indeterminada. Elaborado pela autora; **Quant.:** quantidade. Elaborado pela autora.

No perfil 1, foram observados microplásticos alongados de coloração azul, branca e preta. Ao todo, 11 microplásticos foram observados e descritos no perfil 1 (**Figura 40**).

**Figura 40:** Microplásticos na fração areia - perfil 1

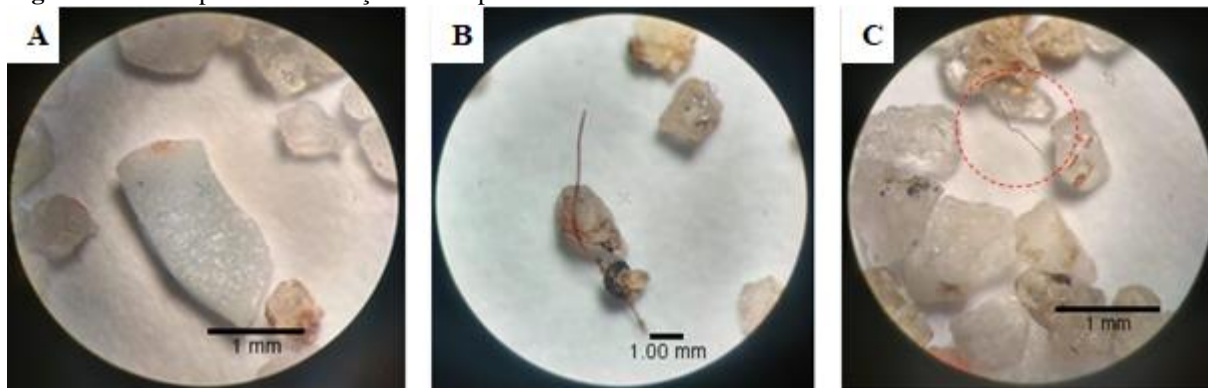


A: material artificial de forma alongada de coloração branca encontrado no horizonte 1 na fração muito grossa; B: material artificial de forma alongada de coloração branca encontrado no horizonte 5 na fração muito grossa; C: material artificial de forma alongada de coloração branca encontrado no horizonte 9 na fração grossa.

Considerando o perfil 1, é verificado que a presença de microplásticos ocorre em seis dos nove horizontes, a exceção são os horizontes 2, 3 e 6. Os microplásticos do horizonte 1 do perfil 1 estão associados a estruturas dos tipos grumos e blocos. O horizonte 1 do perfil 1 além dos microplásticos também apresentou artefatos antrópicos dentro dos agregados identificados durante a análise de DMPs e DMPu.

No perfil 2, microplásticos foram identificados em todos os horizontes sob duas formas (**Figura 41**). Forma não definida e alongada caracterizam os microplásticos do perfil 2 com coloração azul, branco, vermelho e preto, que totalizam 18 fragmentos.

**Figura 41:** Microplásticos na fração areia - perfil 2

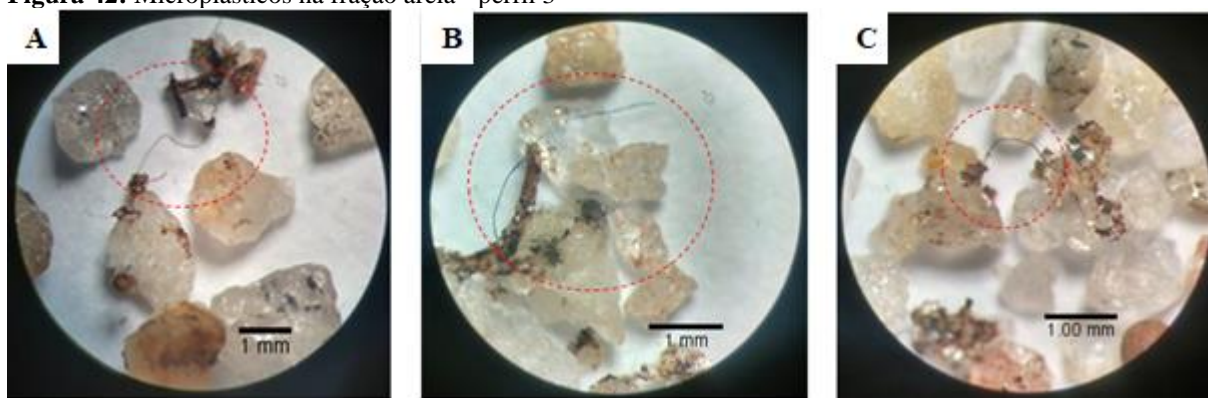


A: material artificial de forma irregular de coloração azul encontrado no horizonte 4 na fração grossa; B: material artificial de forma alongada de coloração vermelha encontrado no horizonte 1 na fração grossa; C: material artificial de forma alongada de coloração azul encontrado no horizonte 8 na grossa.

No perfil 2, os microplásticos encontrados fortalecem os dados obtidos por outras análises que já haviam mostrado a presença de material antrópico dentro do perfil. O fato dos microplásticos terem sido identificados em todos os horizontes, faz com que eles sejam associados a todos os tipos de estruturas descritas durante o trabalho de campo (grumos, blocos, bem como feições maciças e de grãos soltos).

Já no perfil 3, os microplásticos predominantes também foram do tipo alongados (**Figura 42**) de coloração azul, branca, vermelha e preta, que totalizaram 30 fragmentos descritos.

**Figura 42:** Microplásticos na fração areia - perfil 3



A: material artificial de forma alongada de coloração azul encontrado no horizonte 1 na fração muito grossa; B: material artificial de forma alongada de coloração azul encontrado no horizonte 2 na fração muito grossa; C: material artificial de forma alongada de coloração branca encontrado no horizonte 2 na fração grossa.

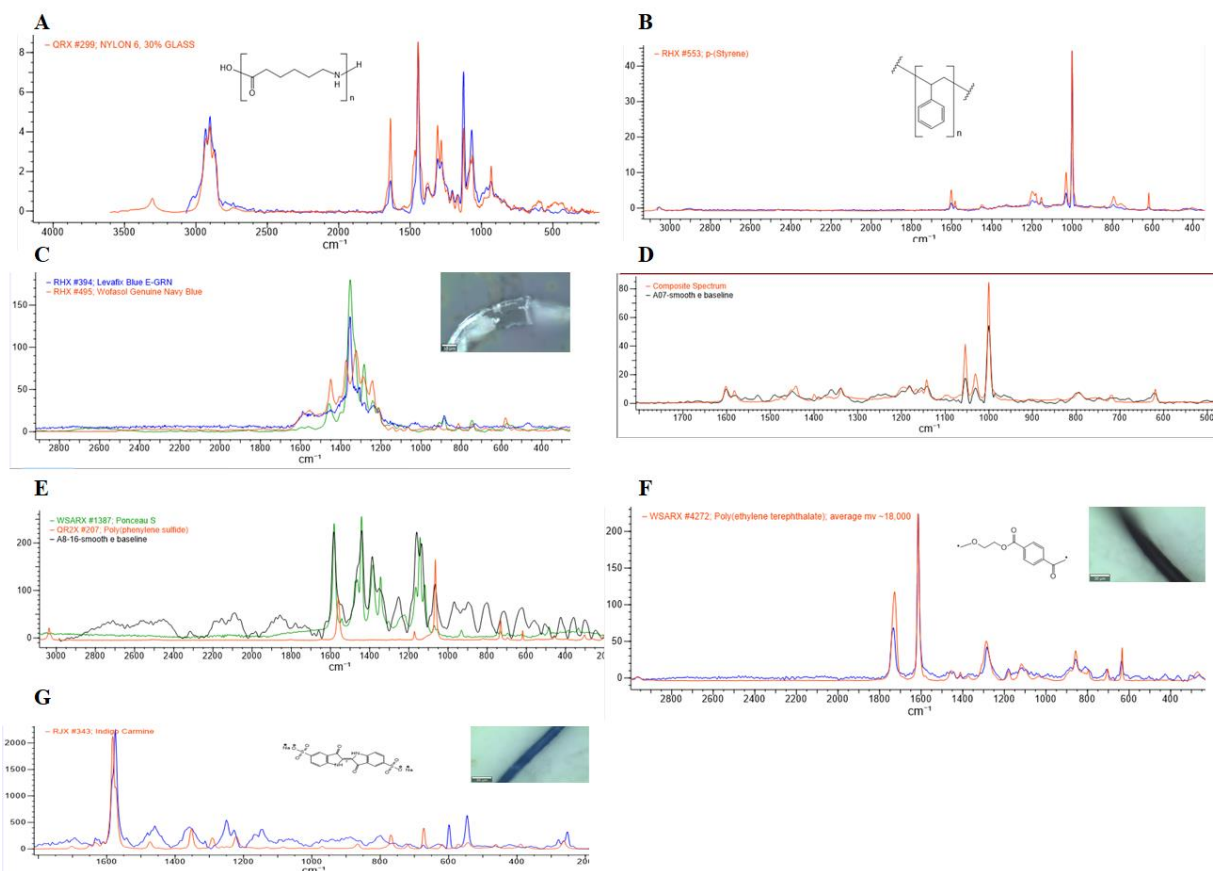
Microplásticos foram identificados em todos os horizontes do perfil 3. Assim como ocorreu no perfil 2 e perfil 1, os dados de microplásticos para o perfil 3 corroboram com os resultados de outras análises, onde artefatos antrópicos foram encontrados, como foi o caso do ensaio de DMP<sub>s</sub> e DMP<sub>u</sub>. Além disso, artefatos antrópicos também foram descritos em blocos, onde não foi necessária a quebra das estruturas para identificá-los. Mais especificamente, esse fato foi identificado no horizonte 1 e horizonte 4 do perfil, como é possível ver na figura 16.

### 5.7.2 – Micro-espectroscopia Raman

A análise por raman confirmou a existência de microplásticos em agregados nos três perfis de solos do Parque Villa-Lobos (**Figura 43**).

Fibras foram as principais formas de microplásticos encontrados, estando presentes em todos os horizontes considerados.

**Figura 43:** Espectros obtidos pela análise Raman



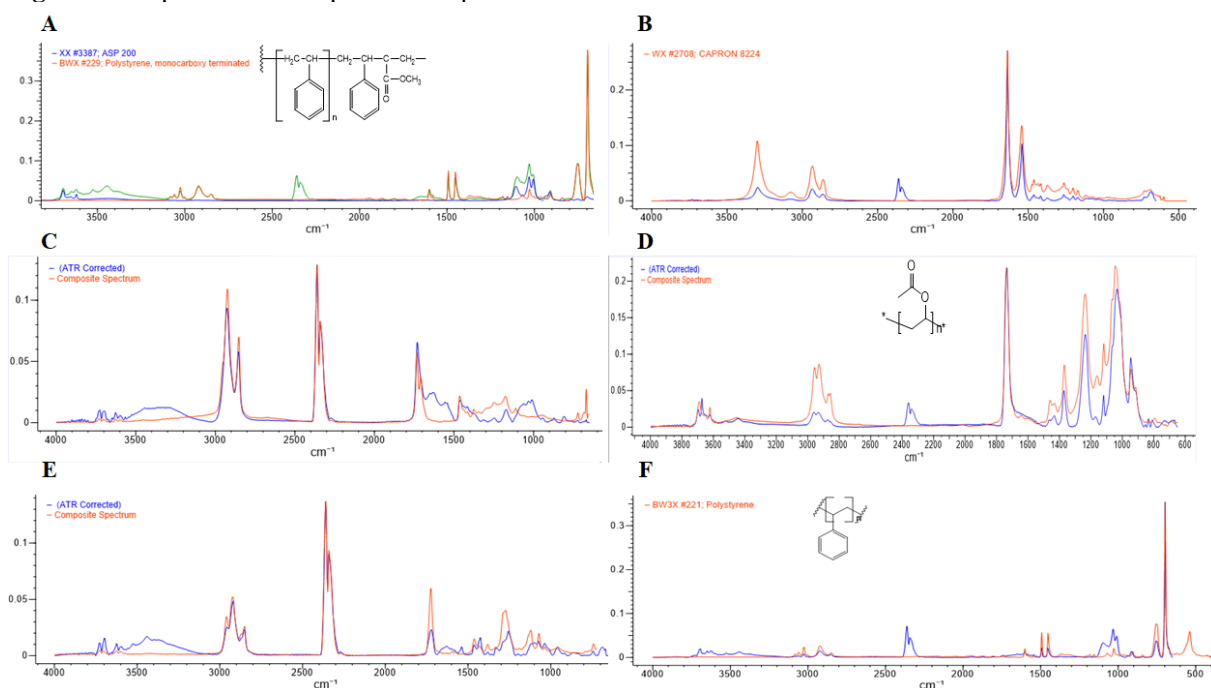
Percebe-se a existência de material sintético, em escala microscópica, nos três perfis de solo. Organizado pela autora.

No perfil 1, por meio do raman, foi identificada partícula de nylon (**Figura 43 A**) em agregado do tipo bloco no horizonte 2. Já no perfil 2, foi identificado polietileno (**Figura 43 B**) em bloco do horizonte 1, e espectros de corante para polímeros (**Figuras 43 D, F e G**) em grumos do horizonte 2. Nas amostras coletadas no perfil 3, também foram obtidos espectros compatíveis com corante para polímeros (**Figura 43 C**) e foi identificada partícula de polietileno (**Figura 43 E**).

### 5.7.3 – Micro-espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

A micro-espectroscopia no infravermelho conseguiu identificar a presença de microplásticos, corroborando com os dados do raman (**Figura 44**). Foi possível obter espectros de materiais coletados nos perfis 1 e 2. Já no perfil 3, a ausência de amostras é justificada pela minúscula dimensão das partículas identificadas. Partícula extremamente pequena dificulta a leitura de seu espectro pelo equipamento.

**Figura 44:** Espectros obtidos pela análise  $\mu$ -FTIR



Percebe-se a existência de material sintético, em escala microscópica, nos perfis de solo 1 e 2. Organizado pela autora.

No horizonte 1 do perfil 1, foi identificada partícula de polietileno (**Figura 44 A**) dentro de blocos. Já no horizonte 2, houve a identificação de nylon (**Figura 44 B**) em amostra de bloco e poliéster (**Figura 44 C**) em amostras de grumos. No perfil 2 foi encontrado acetato de polivinila (**Figura 44 D**) em bloco do horizonte 1, policloreto de vinila (**Figura 44 E**) em blocos do horizonte 2, e polietileno (**Figura 44 F**) em grumos, também do horizonte 2.

## 5.8 – Análises mineralógicas

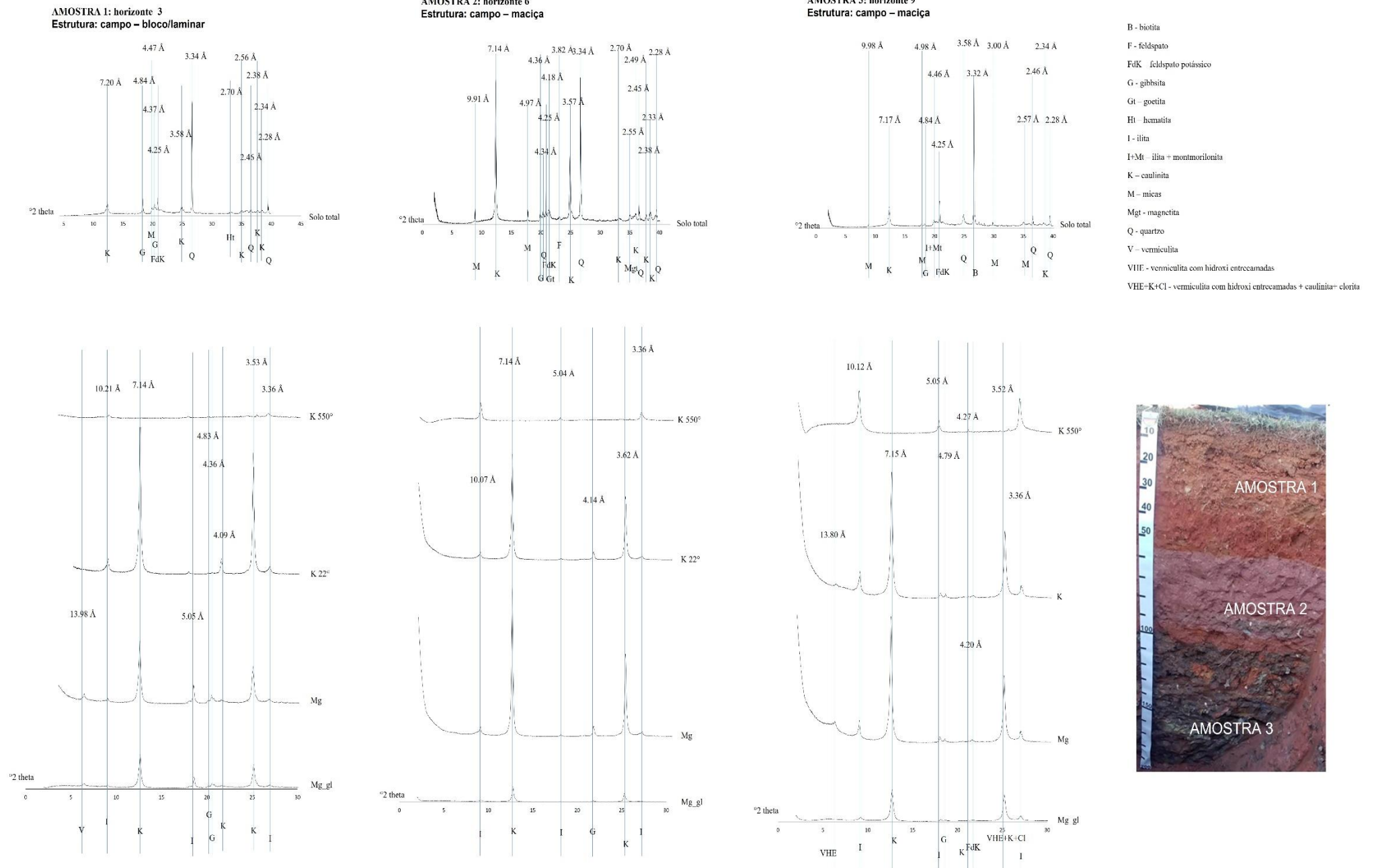
### 5.8.1 – Difratometria de raio-X

Os difratogramas evidenciaram a existência de uma grande variedade de minerais. Minerais primários como quartzo e feldspatos, principalmente o potássico, e o grupo das micas, primárias ou secundárias, estão presentes em todas as amostras do solo total, com exceção do horizonte 7, do perfil 3, onde as micas não foram identificadas.

Destacam-se, ainda, magnetita (2.55 Å) no horizonte 6 do perfil 1 (**Figura 45**), calcita (2.99 Å) no horizonte 7 e apatita carbonatada (2.77 Å) no horizonte 9 do perfil 2 (**Figura 46**). Quanto aos minerais secundários, caulinita e gibbsita estão presentes em todas as amostras, com exceção do horizonte 9 do perfil 1 para gibbsita. Destaca-se, ainda, goethita (4.18 Å) no horizonte 6 do perfil 1 (que apresenta cor 7.5R 5/4), hematita (14.26 Å) no horizonte 1 do perfil 3, clorita (4.79 Å) no horizonte 7 do perfil 2 e lepidocrocita (6.19 Å) no horizonte 9 do perfil 2.



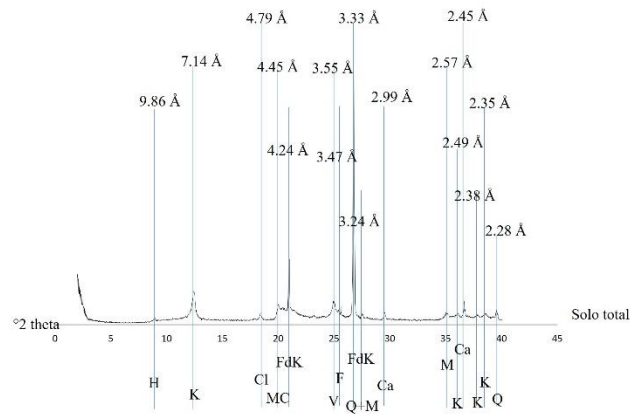
**Figura 45: Difratoograma do perfil 1**



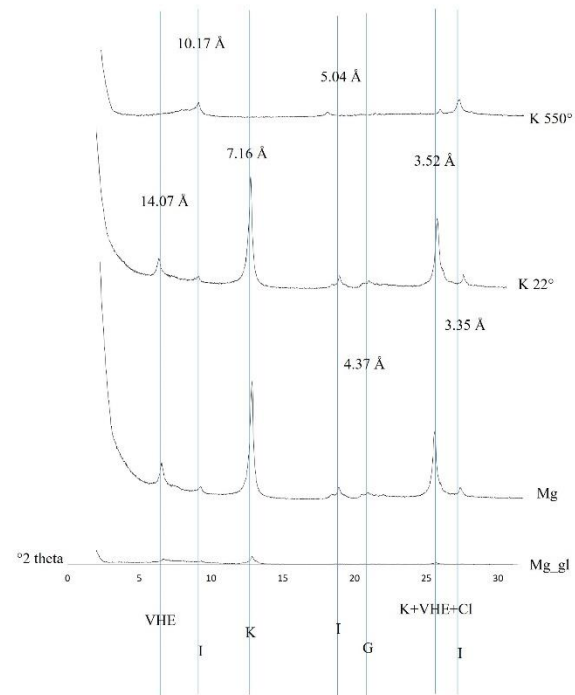
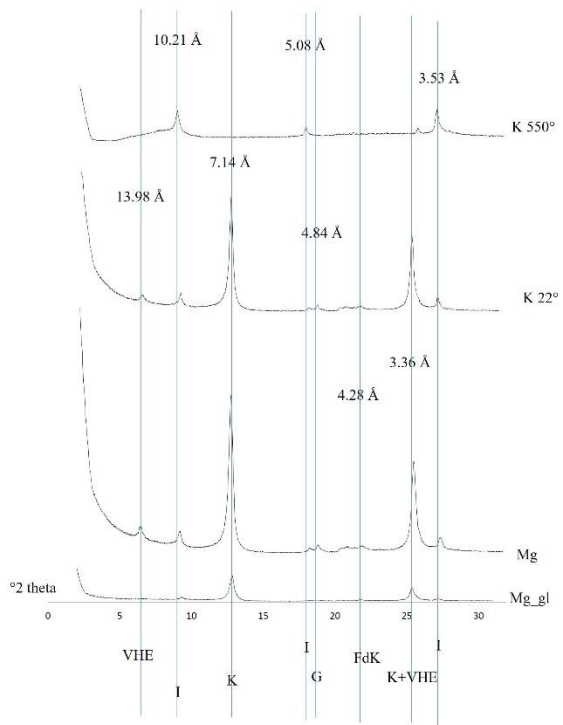
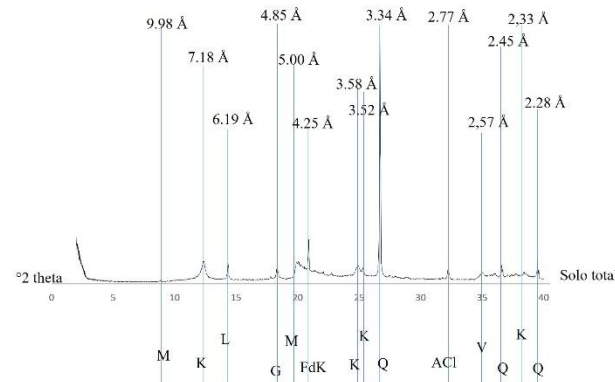
Elaborado pela autora

Figura 46: Difratoograma do perfil 2

**AMOSTRA 4: horizonte 7**  
Estrutura: campo – maciça



**AMOSTRA 5: horizonte 9**  
Estrutura: campo – maciça



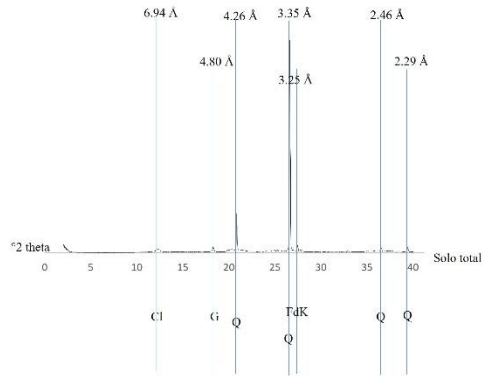
- Ca – calcita
- Cl – clorita
- ACI – apatita carbonatada
- F – feldspato
- FdK – feldspato potássico
- G – gibbsita
- H – haloisita
- I – ilita
- K – caulinita
- K + VHE – calinita + vermiculita com hidróxi entrecamadas
- K + VHE + Cl – calinita + vermiculita com hidróxi entrecamadas + clorita
- L – Lepidocerosita
- M – micas
- MC – minerais cauliniticos
- Q – quartzo
- V – vermiculita
- VHE – vermiculita com hidróxi entrecamadas



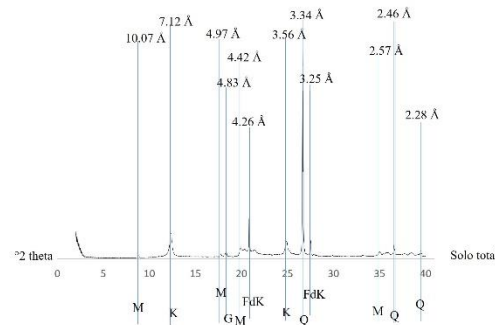
Elaborado pela autora

**Figura 47: Difratograma do perfil 3**

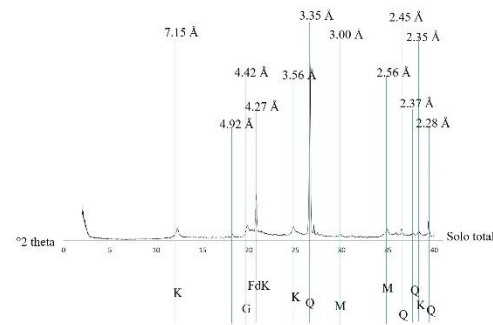
**AMOSTRA 8: horizonte 1**  
Estrutura: campo – granular/bloco;  
MLT – granular



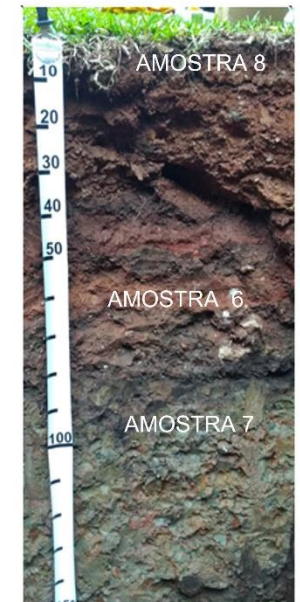
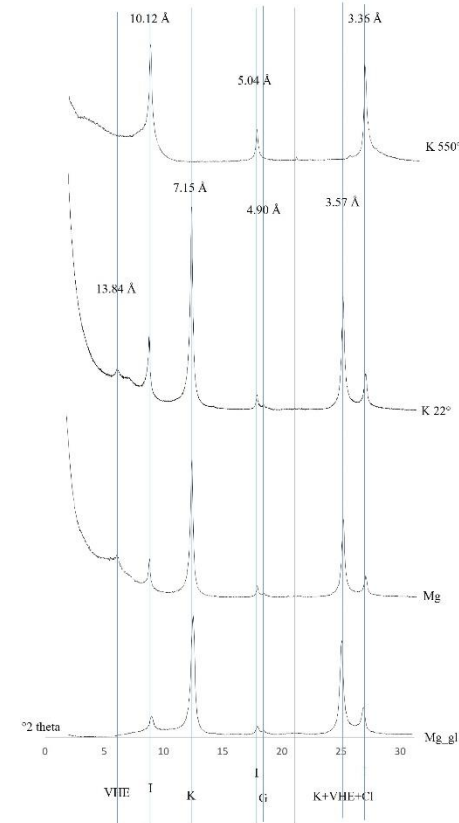
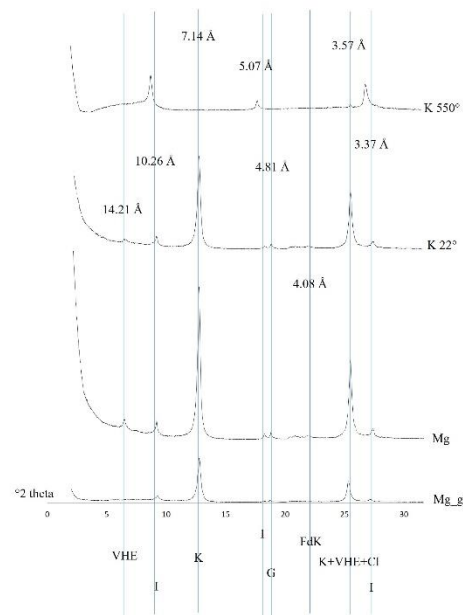
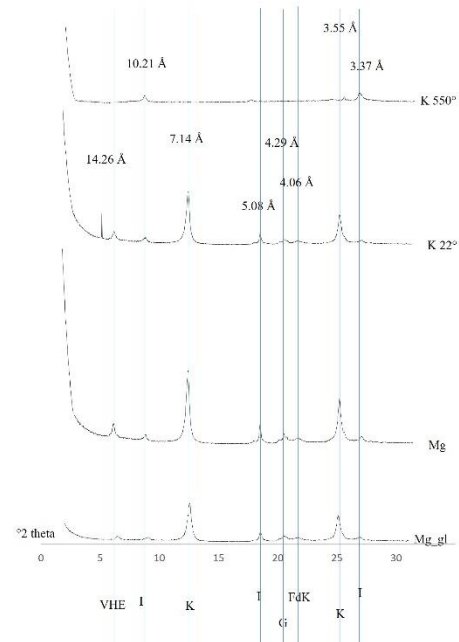
**AMOSTRA 6: horizonte 4**  
Estrutura: campo – bloco; MLT – bloco;  
micromorfologia - bloco



**AMOSTRA 7: horizonte 9**  
Estrutura: campo – maciça



- Cl - clorita
- FdK – feldspato potássico
- G - gibbsita
- I-Mt – illita – montmorilonita
- K - caulinita
- K + VHE – Cl - calinita + vermiculita com hidróxi entrecamadas + clorita
- M – micas
- Q - quartzo
- VHE - vermiculita com hidróxi entrecamadas





Os difratogramas da fração argila mostram a ocorrência de caulinita e illita em todas as amostras analisadas, corroborando a presença destes minerais no solo total. Minerais enriquecidos em  $\text{Al}^{3+}$  também foram identificados, como gibbsita, na maioria das amostras (com exceção do horizonte 9 do perfil 1) e vermiculita hidróxi-entrecamadas (VHE) (13,80 Å) no horizonte 9 do perfil 1 e nos demais horizontes analisados do perfil 2 e perfil 3.

A presença de VHE foi indicada pelos picos de 14,26 Å, 14,21 Å, 14,07 Å, 14,26 Å, 13,98 Å, 13,84 Å e 13,80 Å nas lâminas de  $\text{Mg}^{2+}$  e seu parcial ou total colapso para ~10 Å nas lâminas de  $\text{K}^+$ . Destaca-se que o horizonte 3 do perfil 1 apresentou apenas vermiculita (13,98 Å) e não VHE, uma vez que o pico colapsa totalmente para 10 Å nos tratamentos com  $\text{K}^+$  22° e  $\text{K}^+$  550°.

### **5.8.2 – Espectrometria de fluorescência de raios X**

Por meio da FRX os óxidos maiores foram determinados em oito horizontes. Foram consideradas amostras de solo total e a fração argila total (**Tabela 24**). Percebe-se a tendência de aumento da concentração de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  na fração argila em relação ao solo total, e diminuição do  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_3$  na fração argila em relação ao solo total.

No perfil 1, o horizonte 3, composto por estrutura dos tipos blocos e laminar, as concentrações dos óxidos maiores seguiram a tendência descrita anteriormente. Contudo, chama a atenção o fato de que não houve a detecção de  $\text{MgO}$  no solo total, mas foi encontrado 0,11% de  $\text{MgO}$  na argila. Além disso, no perfil 1 foi identificada, exclusivamente no horizonte 9, a presença de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,1%), reforçando os dados de P extraível (33,1  $\text{mg kg}^{-1}$ ). Os dados do perfil 2 revelam que o horizonte 9, maciço em campo, mas com bloco segundo o MLT e a micromorfologia, apresenta algumas características que diferem do comportamento típico dos dados de FRX. Foi no horizonte 9 do perfil 2, na amostra da fração argila, que houve a maior concentração de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,29%).

Os resultados demonstram que alguns elementos, típicos do processo de urbanização, deixam sua marca no solo. O óxido sulfúrico é típico de poluição atmosférica causada pela queima de combustível fóssil. Em relação a esse óxido, no perfil 3, o horizonte 1, composto por estrutura granular e blocos, os dados demonstram aumento da concentração de  $\text{SO}_3$  na fração argila (0,26%) em relação ao solo total (níveis não detectáveis), diferente de todos os demais horizontes.

**Tabela 24:** Resultado das análises de teores de óxidos maiores

Perfil	Horizonte	Estrutura	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI	Sum
			(% )												
<b>Solo total</b>															
1	3	Bloco/Laminar	47,97	1,39	27,44	7,70	-	-	0,11	-	0,73	-	0,22	13,87	99,44
	6	Maciça	71,89	0,69	14,64	5,40	-	0,17	-	-	0,83	-	0,24	5,27	99,13
	9	Maciça	66,03	0,97	17,06	4,98	-	0,41	0,82	0,17	1,54	0,10	0,33	7,83	100,22
2	7	Maciça	67,77	1,10	16,49	3,79	-	0,27	0,99	-	1,00	-	0,47	7,45	99,34
	9	Maciça	56,18	1,16	17,58	2,46	-	0,34	1,59	0,11	0,68	0,11	0,35	18,50	99,07
3	1	Granular/Bloco	66,02	0,99	14,98	4,83	-	0,18	0,39	0,24	1,15	-	0,22	10,85	99,85
	4	Bloco	62,71	1,07	18,25	5,18	-	0,25	0,43	0,18	1,11	-	0,22	10,10	99,50
	9	Maciça	65,88	1,02	18,18	4,00	-	0,42	0,41	0,11	1,52	-	0,24	8,14	99,92
<b>Fração argila</b>															
1	3	Bloco/Laminar	27,46	1,57	41,13	11,04	-	0,11	-	-	0,58	-	0,21	17,44	99,52
	6	Maciça	37,04	1,42	31,04	16,22	-	0,22	-	-	0,74	-	0,22	12,30	99,20
	9	Maciça	32,24	1,52	38,59	7,05	-	0,68	-	-	0,98	0,12	0,20	17,92	99,31
2	7	Maciça	39,22	1,73	36,02	5,85	-	0,28	-	-	0,80	0,12	0,19	14,92	99,12
	9	Maciça	38,32	1,89	36,73	3,98	-	0,25	0,12	-	0,65	0,29	0,22	16,76	99,21
3	1	Granular/Bloco	27,80	1,88	35,61	13,97	-	0,26	0,18	0,11	0,34	0,26	0,43	19,78	100,62
	4	Bloco	36,73	1,51	34,82	9,69	-	0,25	-	-	0,75	0,12	0,20	15,17	99,26
	9	Maciça	44,39	1,29	31,69	6,87	-	0,59	-	-	1,53	-	0,20	12,66	99,22

LOI é a perda na ignição; Sum é a porcentagem de massa, em base úmida. Elaborado pela autora.

### 5.8.3 – Calorimetria diferencial por varredura e Termogravimetria

A seguir são apresentados os teores de caulinita e gibbsita (**Tabela 25**) calculados a partir da análise de DSC/TG (**Anexo A**). Os dados mostram a constituição típica de solos tropicais, o que significa expressiva quantidade de argilominerais 1:1 (caulinita) e, em menores expressões, de hidróxido de Al (gibbsita). Esses resultados corroboram os de DRX, em que esses minerais foram identificados na grande maioria das amostras.

Os teores de caulinita variam de 285,7 a 571,4 g kg<sup>-1</sup> nas amostras analisadas, enquanto os de gibbsita estão entre 25,6 e 240,4 g kg<sup>-1</sup>. De modo geral, percebe-se o predomínio de caulinita em relação à gibbsita, sendo a exceção o horizonte 3 (12-16 cm) do perfil 1, formado por blocos e estrutura laminar. Destaca-se que a quantidade de argila das amostras 1 do perfil 1 é alta, de 637 g kg<sup>-1</sup>, o que significa grandes quantidades tanto de caulinita quanto de gibbsita em relação ao solo total. Nas demais amostras, os teores de argila variam entre 152 g kg<sup>-1</sup> (Hor. 6, do perfil 1) a 462 g kg<sup>-1</sup> (hor. 9 do perfil 3).

**Tabela 25:** Teores de caulinita e gibbsita

Perfil	Horizonte	Estruturas	Caulinita g kg <sup>-1</sup>	Gibbsita g kg <sup>-1</sup>
1	3	Blocos e laminar	285,7	240,4
	6	Maciça	571,4	25,6
	9	Maciça	414,3	160,3
2	7	Maciça	571,4	80,1
	9	Maciça	487,9	109,0
3	1	Granulares blocos	428,6	80,1
	4	Blocos	535,7	51,3
	9	Maciça	471,4	195,5

Elaborado pela autora.

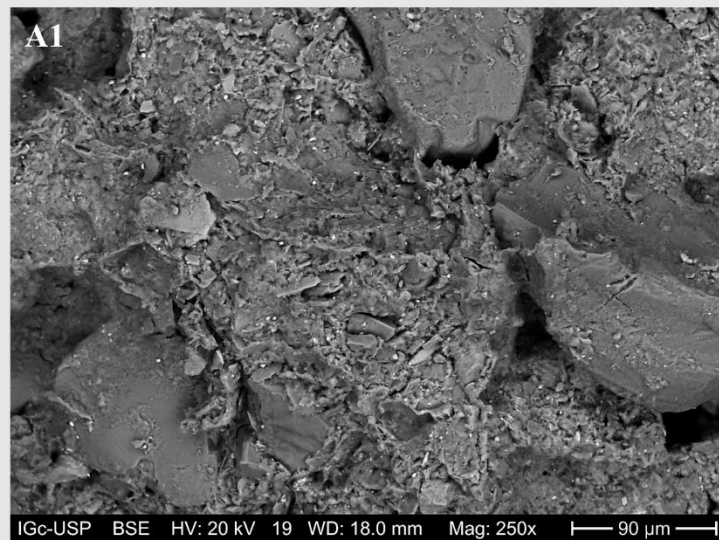
### 5.8.4 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) integrada a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS)

Os resultados demonstram a existência de argilominerais típicos de ambientes tropicais, incluindo de estrutura 1:1 e também óxidos, com destaque à óxido de titânio (**Figura 49**). O horizonte 1 do perfil 2, descrito como formado por blocos e estruturas granulares, apresentou em MEV presença de óxidos (**Figura 48 A1**). Em amostra do horizonte 1 do perfil 3, descrito como formado por blocos e estruturas granulares, foi identificada a presença de caulinitas revestidas com óxidos (**Figura 48 A2**).

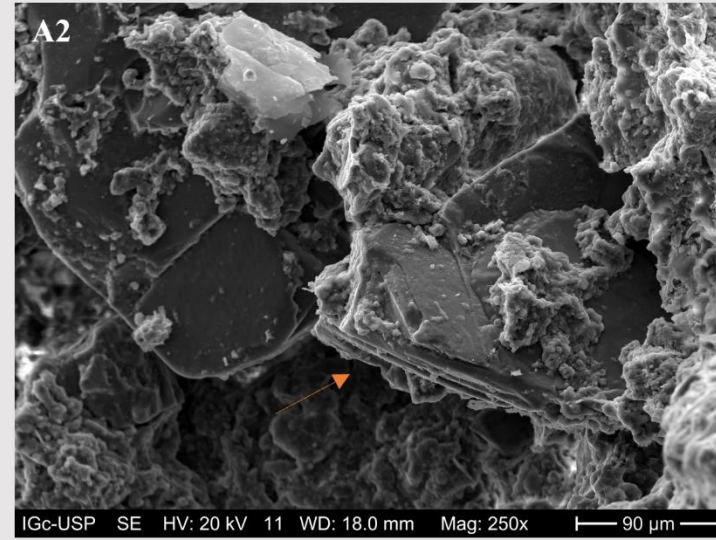


**Figura 48:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) integrado a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) e mapeamento químico de seção do torrão do horizonte 1 do perfil 2

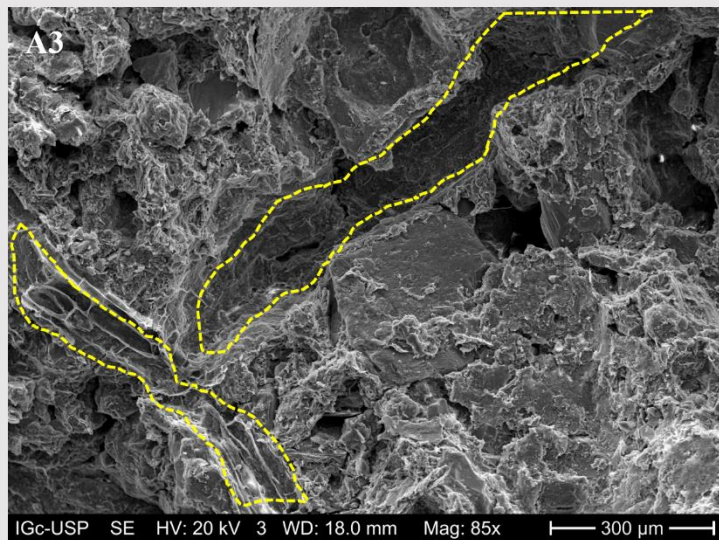
**A –** Microscopia eletrônica de amostras solo em torrões



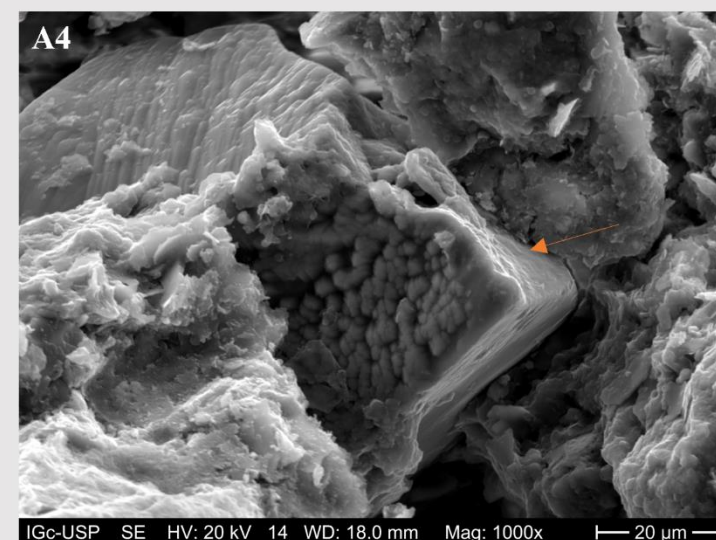
Pontos brilhantes indicam óxidos no horizonte 1 do perfil 2



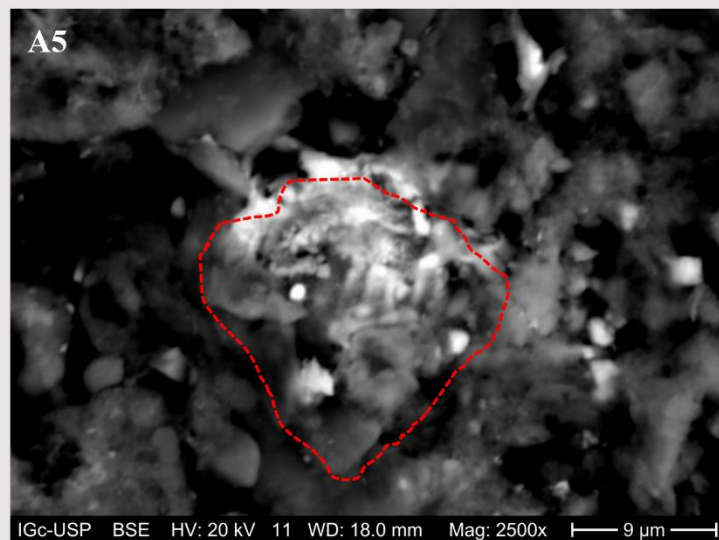
Seta indicando caulinita empilhado no horizonte 1 do perfil 3



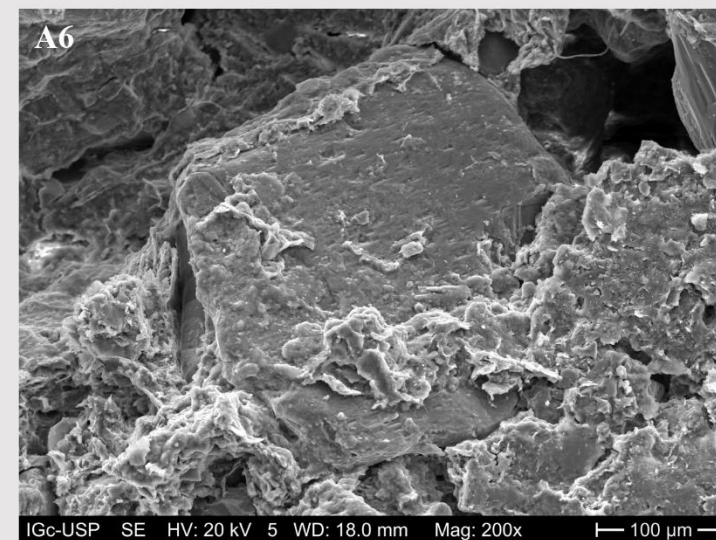
Canais de raízes no horizonte 4 do perfil 3



Seta indicando quartzo com material fino no horizonte 4 do perfil 3

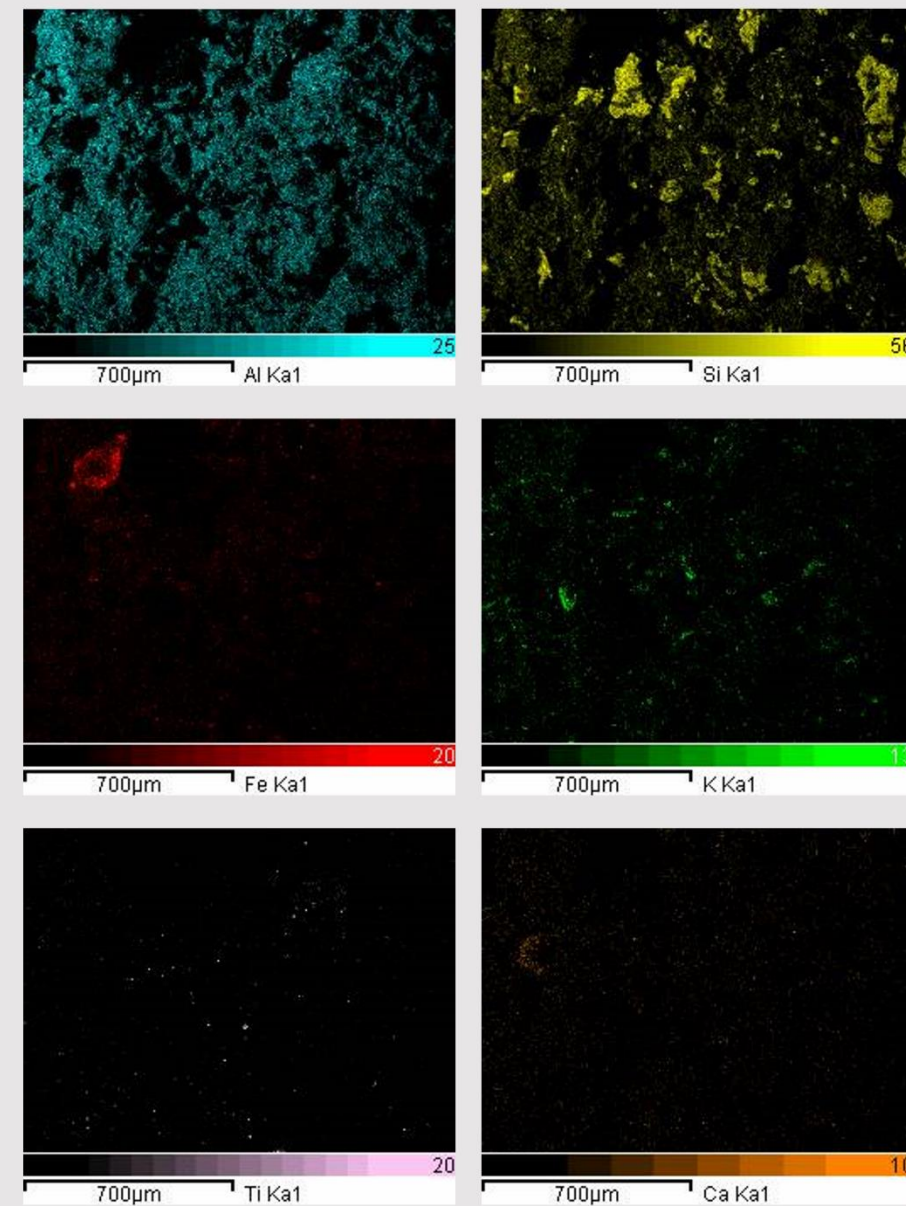
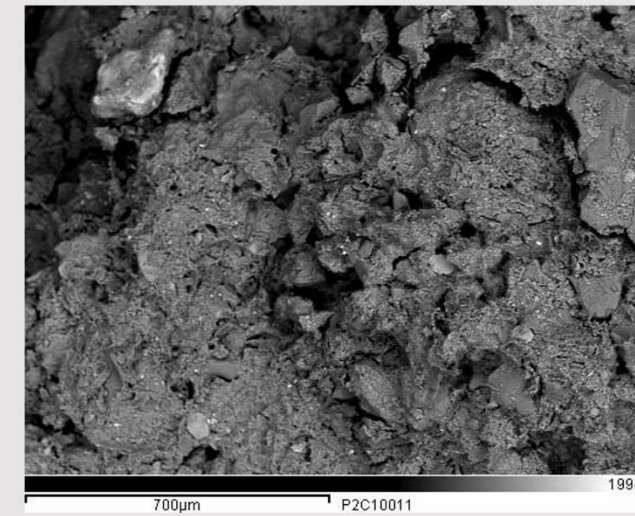


Microagregado rico óxidos no horizonte 4 do perfil 3



Quartzo em processo de dissolução no horizonte 4 do perfil 3

**B –** Mapeamento químico de seção de torrão do horizonte 1 do perfil 2



Elaborado pela autora.



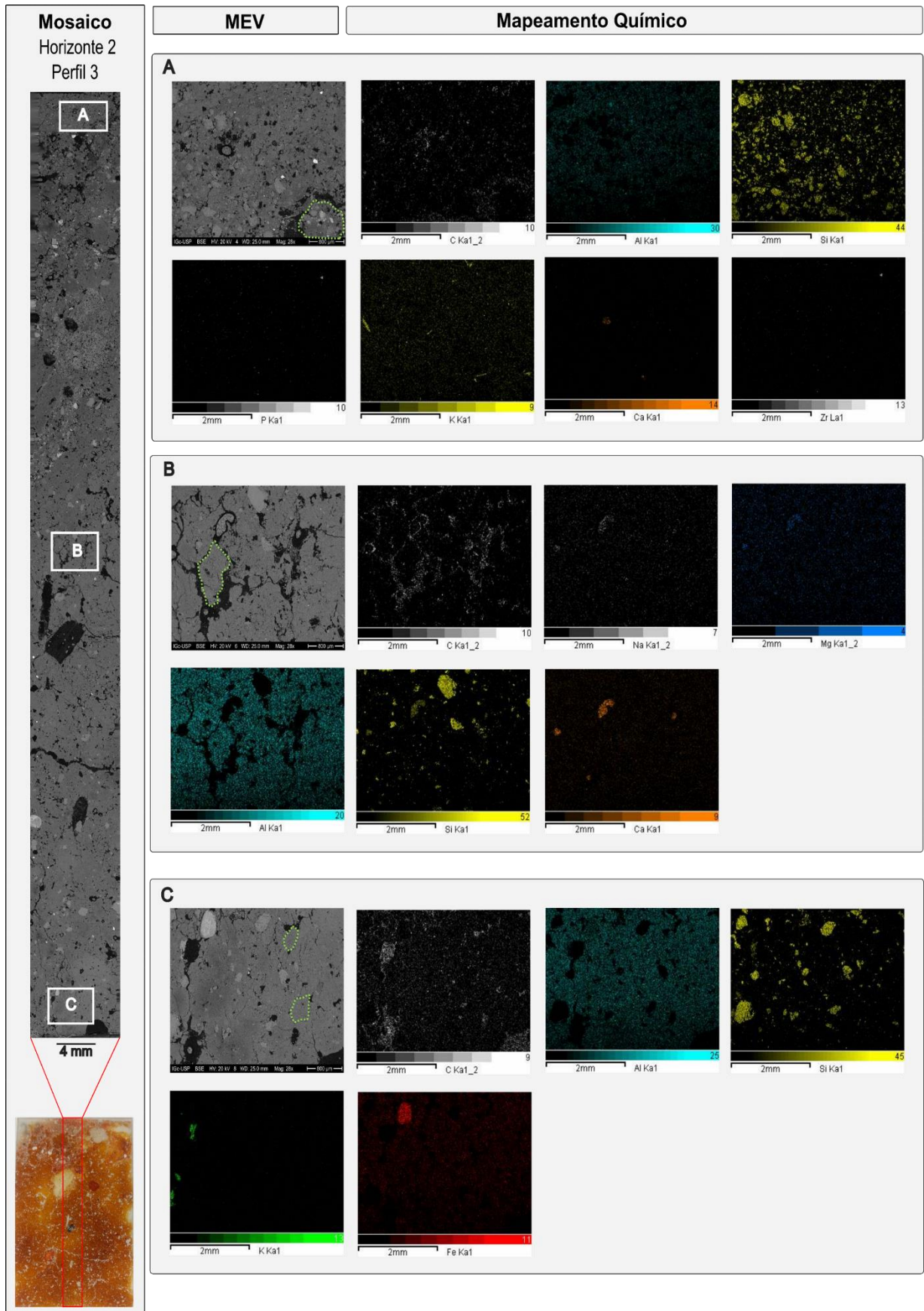
No horizonte 4 do perfil 3 foi identificada a presença de raízes e canais de raízes (**Figura 48 A3**), fortalecendo a importância desse órgão vegetal em solos com estruturas em blocos. Ainda nesse horizonte foi identificada a presença de revestimento com material fino (**Figura 48 A4**). Também no horizonte 4 do perfil 3 microscopia permitiu a distinção visual de microagregado formado por óxidos e caulinita (Figura 48 A5) e golfos de dissolução em quartzo (**Figura 48 A6**), indicando a saída de silício do sistema.

O mapeamento químico de seção do torrão do horizonte 1 do perfil 2 (**Figura 48 B**) apontou a presença de considerável concentração de alumínio, silício, ferro e potássio, titânio e cálcio corroborando com os dados de DRX em relação aos tipos de minerais e argilominerais, incluindo de feldspato potássico ((K, Na, Ca) (Si, Al)<sub>4</sub> O<sub>8</sub>) e gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub>).

Os mosaicos permitiram observar microagregados de solo em todos os horizontes (**Figuras 49 e 50**). No horizonte 2 do perfil 3 (**Figuras 49**), além da concentração de alumínio e sílica, foram identificados setores com acumulação de fósforo, potássio, cálcio, e zircônio, na parte superior da amostra. No centro da amostra chama a atenção a maior concentração de cálcio em relação à sua parte superior, e a presença de sódio e magnésio. Já na parte inferior, destaca-se a presença de um nódulo rico em óxido de ferro e quatro concentrações de potássio.

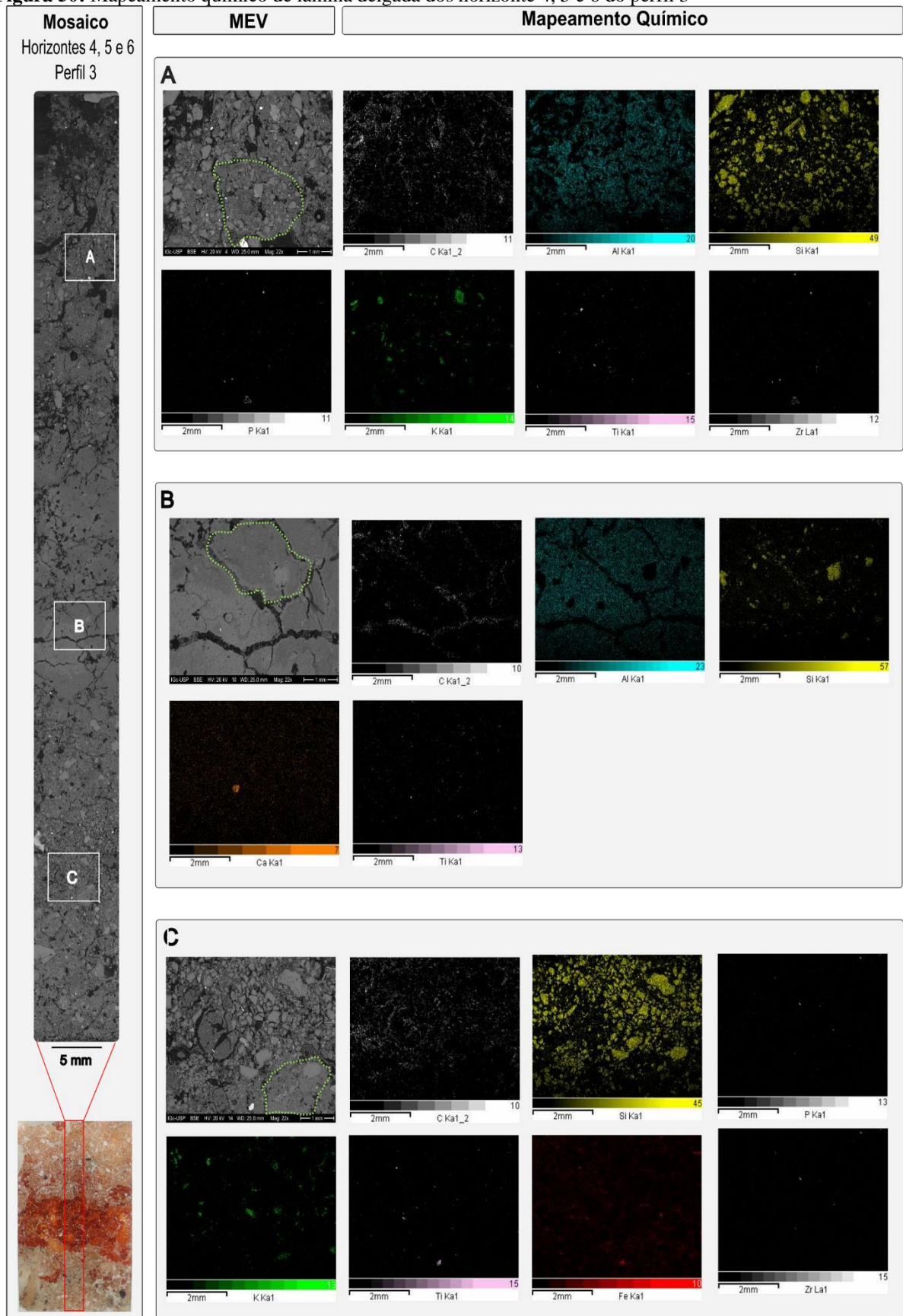
Em relação ao mosaico da lâmina dos horizontes 4, 5 e 6 do perfil 3, além da presença de microagregados, fica evidente a presença de um sistema poroso que conecta os horizontes (**Figuras 50**), o que já havia sido demonstrado na micromorfologia e pelo MLT. As imagens de mapeamento do horizonte 4 deixam claro a expressiva presença de silício e a presença de nódulos ricos em potássio, bem como área com fósforo, titânio e zircônio. No horizonte 5, além do silício, o destaque é para uma pequena região com concentração de cálcio associado à óxido de titânio. Acerca do horizonte 6, deve ser enfatizada a presença de fósforo, potássio, titânio, ferro e zircônio.

**Figura 49:** Mapeamento químico de lâmina delgada do horizonte 2 do perfil 3



Em verde pontilhado são destacados exemplos de microestruturas. Elaborado pela autora.

**Figura 50:** Mapeamento químico de lâmina delgada dos horizontes 4, 5 e 6 do perfil 3



Em verde pontilhado são destacados exemplos de microestruturas. Elaborado pela autora

## 5.9 – Tratamento estatístico

Com os dados obtidos foram geradas as matrizes de correlação, as quais evidenciaram o caráter heterogêneo entre os perfis de solos estudados. Apesar da heterogeneidade nos perfis, é possível perceber algumas correlações significativas entre as variáveis e a condutividade hidráulica. Nos três perfis de solos ocorre relação direta entre a condutividade hidráulica e o conteúdo de carbono.

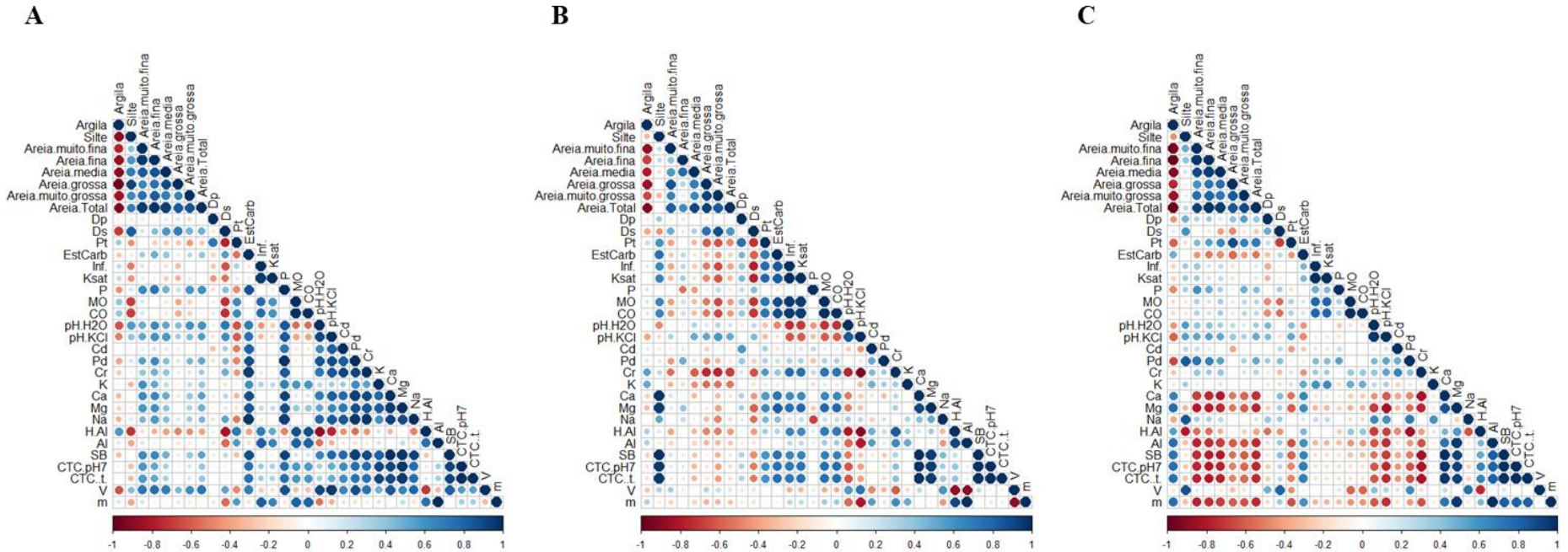
Considerando o perfil 1 composto por horizontes de estruturas granulares, em blocos, laminar e maciça, a matriz de correlação (**Figura 51 A**) demonstra que além do conteúdo de carbono é possível notar que há correlação direta entre a condutividade hidráulica e a acidez do solo, o que inclui o conteúdo de alumínio do perfil. Por outro lado, uma relação inversa é observada entre condutividade hidráulica e a densidade do solo, o que é esperado, pois solos mais densos tendem a ter menor infiltração e percolação.

O perfil 2, formado por horizontes granulares, em blocos, maciços e em grãos solos, os dados correlacionados (**Figura 51 B**) evidenciam que a acidez do solo também apresentou correlação direta com a condutividade hidráulica, assim como a porosidade total e os valores de cálcio. Tal qual o perfil 1, o perfil 2 demonstrou relação inversa em relação à densidade do solo, e deixou explícito que o aumento da areia grossa está associada ao aumento da condutividade hidráulica.

No perfil 3 (**Figura 51 C**), formado por horizontes granulares, em blocos e maciços, diferente dos outros dois perfis, a condutividade hidráulica apresentou poucas variáveis com correlação direta. Além do conteúdo de carbono e matéria orgânica, a única variável associada de modo direto com a condutividade hidráulica foi o potássio. Por outro lado, é perceptível que os valores de densidade de partícula, o conteúdo de magnésio e de alumínio apresentou relação inversa com a condutividade hidráulica, mas com pouca correlação.



**Figura 51:** Gráfico de correlação entre variáveis físicas e químicas



O aumento na dimensão dos círculos é acompanhado da intensificação da coloração. Quanto mais escuro o tom de azul, e por tanto, maior o círculo, mais diretamente proporcional é a correlação entre as variáveis. Quanto mais escuro o tom de vermelho, e por tanto, maior o círculo, mais inversamente proporcional é a correlação entre as variáveis. Em A, B e C o aumento de MO, por exemplo, está acompanhado do aumento de Inf. e Kast, enquanto que a diminuição de MO é acompanhada do aumento de Ds. Elaborado pela autora.

## 6 – Discussão

### 6.1 - Formação e estabilização de agregados nos solos estudados

Os solos do parque Villa-Lobos possuem características típicas de solos construídos aleatoriamente ao longo do tempo. Seus aspectos morfológicos são a expressão de diferentes ações antrópicas, incluindo deposição, revolvimento e compactação, aspectos comuns dos solos construídos pela ação humana (ROKIA *et al.*, 2014; NOVÁK *et al.*, 2020; FURQUIM e ALMEIDA, 2022). Os materiais sobrepostos, caracterizados como depósitos tecnogênicos, são bastante heterogêneos nos três perfis estudados, interferindo nas variações morfológicas entre horizontes, principalmente na diversificação de textura, consistência e cor. Perfil 2, por exemplo, os horizontes 8 e 9 são diferentes uma vez que o primeiro representa a deposição de materiais de coloração 10 YR 6/4 e o subsequente material escuro (10 YR 2/1).

Além disso, os perfis apresentam muitos artefatos antrópicos, característicos de solos construídos pelo homem a partir de deposição de materiais. Assim, por exemplo, o perfil 2 apresentou em seus horizontes diversos fragmentos de concretos, além de plásticos, tijolos, tecidos e concretos. Muitos desses artefatos são, segundo Pinto (1987), resíduos comuns no Brasil, sendo compostos por argamassa (64%), tijolos e blocos (30%) e outros materiais (6%), como concreto, rocha, solo, plástico, madeira e metais. Vários são, inclusive, considerados potencialmente nocivos ao meio ambiente, principalmente betume, polímeros em geral (plásticos), gesso, matéria orgânica e amianto (ANGULO e JOHN, 2002). Muitos desses materiais possuem grande potencial de afetar propriedades do solo (SHARMA e SHARMA, 2019).

Apesar das características dos solos analisados serem influenciadas pelos materiais de origem, o presente estudo mostrou a ocorrência de processos pedogenéticos que resultaram em diferentes horizontes, características e feições pedogenéticas. A presença concomitante de agregados bem desenvolvidos, em forma de grânulos e em blocos, em horizontes com presença de materiais antropogênicos indica a existência de processos evolutivos resultantes da pedalização. Assim, a hipótese sobre a formação de agregados como expressão de um processo dinâmico, provavelmente associado a diferentes gêneses que se sucedem e coexistem no tempo, foi comprovada no presente estudo. Os depósitos tecnogênicos do Parque Villa Lobos provavelmente conferem condições prévias para que haja diferentes tipos de agregados (NIMMO, 2004), devido aos múltiplos tipos de materiais existentes (BIDWELL e HOLE, 1965; RUIZ *et al.*, 2020).

O processo pedogenético de melanização, resultante do aumento das quantidades de C orgânico no solo, foi verificado principalmente nos horizontes superficiais, mas também em horizonte subsuperficial, como no horizonte 9 do perfil 2. O acúmulo de matéria orgânica é um dos fatores que ajuda a entender a existência de agregados granulares nesses horizontes. Mesmo quando não descrito em campo, como no caso do horizonte 9 do perfil 2, agregados granulares foram identificados pelo MLT e micromorfologia.

Conforme citado por Scalenghe e Ferraris (2009) e Séré *et al.* (2010), a presença de material orgânico é fundamental para que os solos degradados, como o solo do parque, sejam recuperados, ao menos do ponto de vista físico. A melanização está provavelmente ocorrendo por bioturbação, pela presença de raízes da cobertura vegetal e a agregação das partículas do solo pelas liberação de exsudatos na rizosfera, substâncias produzida por fungos micorrízicos que serve como uma cola (XIE e al., 2015). Esses agregados biogênicos representam, em média, 40-60 % do peso do solo nos 15 cm superiores e podem ocorrer associados aos agregados de origem fisicogênicos (LAVELLE *et al.*, 2020), como os blocos descritos nos primeiros horizontes dos solos do parque.

Especificamente sobre a matéria orgânica, Lal (1985) diz que trata-se de um componente fundamental na agregação do solo por contém substâncias como polissacarídeos e gomas, que agem como material adesivo, ajudando a unir as partículas de solo em agregados maiores. Essas substâncias atuam ainda como um "cimento" natural, fornecendo estabilidade e não apenas a união entre partículas. Ainda segundo Lal (1985) a matéria orgânica tem uma alta capacidade de retenção de água, o que fundamental para a ocorrência de processos químicos nos solos.

Ressalta-se que a existência de horizontes formados por materiais sobrepostos abre a possibilidade do solo conter agregados herdados desses materiais depositados. Contudo, associada à maior presença de MO na maioria dos horizontes com estrutura granular, soma-se o grau de estruturação moderado ou forte descrito em campo e o forte grau de pedalidade indicado em micromorfologia, reforçando que possivelmente está ocorrendo a formação *in situ* de agregados. Além disso, a ocorrência de processo de plasma *infusion*, transformando partículas de areia em partículas de silte, em material antrópico e em material saprolítico, indica uma modificação na matriz do solo que pode contribuir para a formação de agregados, conforme será explicado em maiores detalhes no item 6.2.

Por outro lado, agregados em forma de blocos e lâminas, como foram descritos no parque Villa-Lobos, são normalmente de origem fisicogênica, principalmente como resultados

da expansão e contração (LAVELLE *et al.*, 2020). Considerando a existência de diferentes momentos de deposição, provavelmente o material foi exposto à ação do clima, favorecendo a ação de processos físicos relacionados à formação de agregados. Assim, períodos de baixa pluviosidade, típicos do outono e inverno na cidade de São Paulo (FONTÃO *et al.*, 2018), associados às características dos materiais, principalmente a existência de argilominerais 2:1, podem ter contribuído para a formação da fissura (macroporos). Durante os períodos de chuva, essas fissuras podem tornarem-se caminhos preferenciais para a infiltração, como observado por Huot *et al.* (2013) em Technosol, bem como serem espaços vulneráveis ao preenchidos por material sobreposto.

A textura dos horizontes também está, provavelmente, afetando a forma dos agregados do solo no parque Villa-Lobos. Conforme encontrado por Silva *et al.* (2016), teores significativos de areia, como nos horizontes 1 e 3 do perfil 3, com a presença de matéria orgânica devem ser responsáveis pelo desenvolvimento de estruturas com formas mais esféricas (forma granular), enquanto maiores teores de argila refletem em estruturas mais angulosas, tais quais os blocos encontrados ao longo dos três perfis, como no horizonte 3 do perfil 1, horizonte 1 do perfil 2 e horizonte 10 do perfil 3.

Fatores físicos, químicos e biológicos ocorrem nos solos em locais de deposições de material antrópico, assim como em solos naturais (GREGORY *et al.*, 2015). No parque Villa-Lobos, os processos pedogenéticos ocorrem em horizontes de origens diversas e tão complexos quanto os três diferentes depósitos esperados (orgânico, entulho e de material de dragagem). Trata-se de horizontes formados por materiais previamente intemperizados (semelhantes a saprolitos) e solos de diferentes origens.

Materiais previamente intemperizados, como indicado pela mineralogia, podem ser mais facilmente acessíveis aos processos pedogenéticos, em comparação a outros materiais parentais, como rochas. Com isso, há possivelmente a redução do tempo necessário para a formação de um solo em *in situ* e também do processo de agregação. Este seria o caso do horizonte 4 do perfil 1, que em escala macro foi descrito como maciço, e formado por material previamente intemperizado (semelhante à saprólito), mas que em lâmina delgada apresenta microagregados.

Os resultados indicam que não apenas está havendo a formação de estruturas, mas também a ocorrência de formação de um ambiente propício à estabilização dos agregados. No parque Villa-Lobos, a estabilização é afetada pelo pH básico do solo, a presença de cátions como  $\text{Ca}^{2+}$ , e o tipo de argila. Entulhos da construção civil são resíduos comuns nos solos

(MOREL *et al.*, 2015) e por serem materiais ricos em carbonatos tendem a elevar o pH do solo (ANDERSON *et al.*, 2013) aumentando a possibilidade de processo de agregação (VIRTO *et al.*, 2011). Cátions como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , colaboram com a flocculação através de pontes catiônicas com partículas de argila e carbono orgânico, enquanto  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  promovem dispersão e efeitos negativos na estrutura do solo (STRAWN, 2021).

Assim como em Farahani *et al.* (2018), os resultados apontam que a agregação pode estar sob o efeito negativo do sódio. Em quase todos os horizontes com concentração de  $\text{Na}^+ > 0,4 \text{ mmolc kg}^{-1}$  não foi encontrada a presença de agregados. Se a concentração de  $\text{Na}^+$  está afetando a formação de agregados no parque Villa-Lobos, a concentração de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  provavelmente não está. O  $\text{Al}^{3+}$  e o  $\text{Fe}^{3+}$  controlam a agregação em solos ácidos com baixo teor de argila, como os Latossolos (MUGGLER *et al.*, 1999; AVANZI *et al.*, 2011). A solubilidade e a mobilidade do  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  para interagir com a caulinita, se faz em ambiente ácido (JANSEN *et al.*, 2003). O fato dos solos do parque Villa-Lobos apresentarem horizontes alcalinos possivelmente inibe a atuação do  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  na agregação.

Os argilominerais possivelmente estão afetando a gênese dos agregados do solo. Conforme demonstrado por estudos anteriores (FERNANDEZ-UGALDE *et al.*, 2013; DENG *et al.*, 2015; KOME *et al.*, 2019), os argilominerais influenciam a agregação de acordo com sua área superficial. A CTC, a expansibilidade e as taxas de decomposição do carbono orgânico são propriedades do solo diretamente relacionadas com a dimensão da área superficial dos argilominerais presentes no solo. Os argilominerais não expansivos, como a caulinita (1:1), comum nos solos do parque, possuem baixa CTC e menor área superficial, do que argilominerais 2:1, o que tende a diminuir a interação entre os componentes do solo (KUMARI e MOHAN, 2021).

A estabilização dos agregados provavelmente está subordinada à influência dos argilominerais após a degradação da matéria orgânica, principalmente nos horizontes superficiais. Os argilominerais podem ter comportamento mais estável do que algumas frações de matéria orgânica (SIX *et al.*, 2002), como substâncias não húmicas, as quais são importantes na agregação inicial (TISDALL e OADES, 1982). A estabilização dos blocos pode estar associada à presença de minerais argilosos 1:1, típicos em solos tropicais (RYAN e HUERTAS, 2013) e comuns nos solos do parque. Segundo Six *et al.* (2002), argilominerais 1:1 proporcionam estabilidade ao solo quando o teor de matéria orgânica diminui. Além disso, como observado por microscopia eletrônica de varredura, minerais como quartzo e argilominerais, principalmente caulinita, estão recobertos com material da fração argila que

inclui óxidos, como no horizonte 4 do perfil 3, o que pode contribuir para estabilização dos agregados. Maiores detalhes sobre a interação entre mineralogia e agregação serão fornecidos no item 6.2.

Além da mineralogia, há também a atuação da matéria orgânica melhorando o crescimento e estabilização dos agregados, como mostrado na seção delgada, onde foram observados excrementos dentro dos agregados do solo, ou seja, os excrementos, ao longo de seu processo de decomposição, podem ser incorporados aos agregados.

Estudos demonstrando a existência de agregados em solos construídos já foram divulgados previamente (STUMPF *et al.*, 2016; DEEB *et al.*, 2017; ZHOU *et al.*, 2021), mas o tempo e a complexidade dos mecanismos necessários para formar novos agregados estáveis em ambiente altamente modificados ainda precisa ser melhor compreendido. Fato é que os resultados da pesquisa apontam que solos construídos, como os solos heterogêneos do Villa-Lobos, em cerca de 30 anos desenvolveram horizontes com estruturas variadas em tamanho, grau e forma. São estruturas que segundo o teste de estabilidade de agregados já possuem boa estabilidade.

De acordo com Lavelle *et al.* (2020) e Domínguez-Haydar (et al., 2020) normalmente macroagregados, como os grânulos descritos no parque, se formam rapidamente, mas têm uma existência breve, pois quando as raízes que os compõem desaparecem e o material orgânico é mineralizado, o solo tende a perder agregação, caso não haja a estabilização.

## 6.2 - Caracterização mineralógica de solo urbano em ambiente subtropical

A composição mineralógica da fração argila e do solo total afeta diferentes propriedades químicas e físicas dos solos (SANTOS *et al.*, 2017). Dentre as propriedades químicas influenciadas pelos tipos de argilominerais está a capacidade de troca catiônica, e conseqüentemente a fertilidade do solo (KOME *et al.*, 2019), e a sorção de metais potencialmente tóxicos e outros contaminantes (MIRANDA-TREVINO e COLES, 2003; UGWU e IGBOKWE, 2019). A estrutura, e como reflexo, a porosidade solo, são propriedades físicas que refletem, em certa medida, não apenas os tipos, mas também a quantidade de argilominerais (KUMARI e MOHAN, 2021; KAY, 1997).

O processo de agregação do solo rotineiramente é explicado por meio de um sistema hierárquico. Esse sistema, pensado a partir de solos de ambientes temperados, não considera, ao menos de modo direto, as profundas modificações antrópicas às quais os solos estão suscetíveis. Proposto por Tisdall e Oades (1982), o modelo enfatiza o papel das hifas de fungos para a formação de agregados menores e de filossilicatos para agregados maiores, principalmente atuando na estabilização das estruturas. Partindo dessa premissa, trabalhos desenvolvidos em meio subtropical, como Lin *et al.* (2022) conseguiram apresentar a importância de óxidos no processo de agregação. Além disso, pesquisas demonstram o papel fundamental do material parental na origem dos argilominerais que atuam na agregação do solo (AZEVEDO e VIDAL-TORRADO, 2009).

Apesar da composição variada, os três perfis de solos analisados compartilham a presença de óxidos e, principalmente, argilominerais 1:1, características típicas de solos sob clima subtropical, como também apresentam argilominerais do tipo 2:1. Já foi apontado que o tipo de argilomineral (1:1 ou 2:1) afeta a agregação do solo devido à diferença na dimensão da área superficial e em função da quantidade de cargas superficiais que possuem (KUMARI e MOHAN, 2021).

O fato do DRX indicar a presença de gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) e principalmente caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) em horizontes compostos por blocos, sinaliza que esses agregados podem estar em fase de estabilização por esses argilominerais. Argilominerais 1:1 são fundamentais para a estabilização de estruturas formadas em solos de ambientes subtropicais (DENEFF *et al.*, 2002; LIN *et al.*, 2022).

Fourvel *et al.* (2018) e Li *et al.* (2020) relacionaram o pH alcalino do ambiente à formação de agregados em solos ricos em minerais argilosos 1:1. Assim, em solos urbanos, como os estudados, os processos de formação e estabilização ocorrem em resposta à

coexistência do pH básico, devido à existência de entulho, e a matriz do solo constituída principalmente de argilomineral 1:1.

A caulinita, como observada por MEV em amostra do horizonte 1 do perfil 3, formado por blocos e grânulos, tem uma boa capacidade de floculação e estabilização por interações eletrostáticas (DENEFF *et al.*, 2002). Entretanto, comparando sua capacidade de agregação com argilas de alta atividade, como vermiculita, presente no horizonte 3 do perfil 1 nota-se importante diferença. As argilas 2:1 são mais eficazes do que as 1:1 (DENEFF *et al.*, 2002; BRONICK e LAL, 2005). Apesar de os argilominerais 2:1 serem mais ativos do que 1:1 (Six *et al.*, 2000) e contribuírem com a agregação, o seu processo de expansão e contração pode aumentar a possibilidade de ruptura da agregação durante os ciclos úmido-seco, diminuindo a estabilidade do agregado (BRONICK e LAL, 2005; ALMAJMAIE *et al.*, 2017).

A respeito da gênese dos argilominerais 1:1, a ocorrência do processo de plasma infusion, como demonstrado pela micromorfologia, pode corroborar para que haja a formação de partículas menores (ESWARAN *et al.*, 1975). Isso significa maior área superficial para ocorrência de reações químicas, o que pode contribuir para a formação de argilominerais 1:1 por hidrólise (JACKSON, 1957; WILSON, 1999; GALÁN, 2006). Contudo, no caso estudado, a presença de caulinita possivelmente é herança do material pré-intemperizado (alterita) depositado no local. Isso porque o fato do pH dos horizontes, devido à presença de material antrópico rico em carbonato, são básicos. Segundo Miranda-Trevino e Coles (2003), pH básico restringe a formação de caulinita.

Dentre os picos de caulinita, muitos foram identificados em horizontes onde também há feldspato ((K, Na, Ca)(Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>), biotita (K(Mg,Fe)<sub>3</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(F,OH)<sub>2</sub>) e micas não diferenciadas. Esses minerais podem ter dado origem a essas caulinitas, antes de ter havido a formação do depósito que deu origem aos solos do parque. Esse tipo de transformação já foi bem relatada em trabalhos prévios (STOCH e SIKORA, 1976; JOLICOEUR *et al.*, 2000; MIRANDA-TREVINO e COLES, 2003).

No caso da presença de haloisita, identificada em picos no difratograma do perfil 2 (hor. 9), sua origem pode estar no intemperismo do feldspato existente no mesmo horizonte. Esse mineral é pertencente ao grupo das caulinitas (CHURCHMAN *et al.*, 1984), mas com sua camada 1:1 trançada pela diferença na dimensão de suas camadas tetraédricas e octaédricas (HE *et al.*, 2017). Devido a sua morfologia, a haloisita, quando presente em expressiva quantidade, possui, ao menos em associação com a ferridrita, melhor potencial de estruturação do solo, do que quando o solo contém a mesma quantidade de caulinita (WEST *et al.*, 2004).



Encontrados em diversos horizontes, as micas são representadas principalmente pela muscovita, biotita e illita (RIEDER *et al.*, 1998). No solo do Villa-Lobos prevaleceu a presença de biotita e illita, muitas vezes em associação com outros argilominerais, como a montmorilonita, indicando processo de transformação.

A biotita, material trioctaedral com sítios ocupados por Mg e Fe e presença de K entre camadas, é típica de fração grossa de solos pouco intemperizados, ou na fração argila em profundidade no perfil (KAMPF *et al.*, 2009). O fato de haver biotita no horizonte 9 do perfil 2 indica o potencial de ocorrência de formação de argilominerais devido à sua alta susceptibilidade à alterações. Por apresentar K entre camadas, a biotita não possui capacidade de expansão. Porém, como citado por FORDHAM (1990) é um grupo de mineral que pode originar argilomineral 2:1 devido a transformações em sua estrutura.

A presença de filossilicatos não expansíveis, como caulinita, pode influenciar negativamente a formação fisicogênica de estruturas, uma vez que não contribui com a formação de zonas de fraquezas as são responsáveis pela formação de estruturas do tipo blocos. Essa ação negativa, na formação de estruturas, pode ser vista em horizontes descritos como maciços (hor. 6 e 9 do perfil 1, hor. 7 do perfil 2, e hor. 9 do perfil 3). Porém, ainda assim, esses filossilicatos podem estar atuando na estabilização de estruturas em outros horizontes, como é o caso do horizonte 3 do perfil 1, no qual foi identificada a presença de blocos.

Grupos de argilominerais 2:1, como encontrados nos perfis 1 (hor. 3) e 3 (hor. 1 e 4) possuem estrutura interna com capacidade de expansão (KOME *et al.*, 2019), característica reforçada em ambientes de períodos de umedecimento e secagem (RUEDRICH *et al.*, 2011). Para LAVELLE *et al.* (2020) essa característica, típicas vermiculita e montmorilonita, possibilita o surgimento de estruturas fisicogênicas, ou seja, estruturas dependentes do comportamento físico dos argilominerais.

A vermiculita, identificada no solo total e na fração argila de diversos horizontes, pode conferir aos solos comportamento expansivo (BARNHISEL e BERTSCH, 1989; SODANO *et al.*, 2016). Porém, no caso estudado, também foram identificadas a existência de vermiculita estratificada associada à caulinita e clorita o que pode afetar o comportamento físico dos horizontes à ponto de contribuir negativamente com a formação de blocos.

No caso exclusivo de vermiculitas, sua presença pode indicar uma fase transitória na formação de esmectitas/montmorilonitas a partir de micas (MALLA *et al.*, 1978. RANSOM *et al.*, 1988). Esse processo pode estar ocorrendo nos três perfis. No perfil 1, nos horizontes 3 e 9

foram identificados tanto picos bem claros de vermiculita, quanto de micas. O mesmo pode-se dizer a respeito dos horizontes 7 e 9 do perfil 2 e em relação ao horizonte 9 do perfil 3.

Com menor capacidade de expansão do que as vermiculitas, apesar de possuir maior área superficial específica, esmectita/montmorilonita, aparentemente em pequenas quantidades, foram identificadas em diversos horizontes, muitos deles maciços. Diferente da formação da caulinita, que ocorre em ambiente de pH ácido (WILSON, 1999; PAUL *et al.*, 2021), o que nos faz pensar que esse esteja ocorrendo no perfil de solo formado pela ação humana.

No perfil 2 (hor. 7 e 9) e no perfil 3 (hor. 4) micas associadas com montmorilonitas podem indicar a transformação das primeiras nas segundas. Esse mecanismo ocorre pela saída de K das entrecamadas e formação de esmectitas/montmorilonitas, devido a substituição de Al por Si (ROBERT, 1973; AZEVEDO e VIDAL-TORRADO, 2009). Além disso, o processo de formação de esmectita/montmorilonita pode se dar pela transformação da clorita (MCKINLEY *et al.*, 1999). No caso estudado, diversos horizontes apresentam a concomitante presença de clorita, montmorilonita (perfil 1, hor. 9; perfil 2, hor. 7 e 9; perfil 3, hor. 4 e 9) indicando que a transformação pode estar ocorrendo, aumentando a concentração de argilomineral 2:1 no solo.

O DRX revelou a presença magnetita na fração argila no perfil 1 (hor. 6). A magnetita tem como possível origem rochas magmáticas e metamórficas (COSTA e BIGHAM, 2009). Devido às condições ambientais, a origem possível da magnetita encontrada no parque Villa-Lobos é da quebra de silte e areia presentes no material depositado no terreno.

Comuns em solos brasileiros, e encontradas nos solos do parque Villa-Lobos, goethita e hematita, possuem gêneses diferentes (COSTA e BIGHAM, 2009). No caso dos solos do parque o que é possível afirmar é tratam de óxidos herdados do material de deposição. Além disso, como demonstrado por Guhra *et al.* (2022), óxidos, como a hematita, quando associado a presença de matéria orgânica, como indicado pelo DRX de amostra do horizonte 4 do perfil 3, tende a proporcionar a estabilização da agregação em blocos.

Descrevendo as alterações mineralógicas para confecção de cerâmica, Rocha *et al.* (2014) verificaram que após o processo de queima, quartzo e ilitas são os constituintes principais do material. Resultado similar foi encontrado por Silva *et al.* (2011), porém, devido à diferença na fonte da matéria prima, o DRX apontou ainda a presença de hematita e haloisita. Assim, a presença desses silicatos e óxidos em solos alterados podem ter relação com os artefatos antrópicos como tijolos e cerâmicas.

### 6.3 - Agregação do solo e a presença de artefato antrópico do tipo microplástico

Os solos de áreas urbanas são modificados pelas ações antrópicas de diferentes intensidades (ROSSITER, 2007) incluindo a introdução de artefatos de diferentes naturezas (PUSKÁS e FARSANG, 2009), incluindo plásticos em diferentes tamanhos (WEBER, 2022). Menores do que 5 mm, os microplásticos têm sido estudados em relação a sua capacidade de modificar propriedades químicas e físicas dos solos (BÜKS e KAUPENJOHANN, 2020).

O trabalho demonstrou que a agregação dos solos é um dos processos que podem ser afetados pelos artefatos antrópicos, pois materiais de diferentes composições podem interagir com a matriz do solo modificando o potencial de formação de estruturas. A formação de estruturas, principalmente em formato de grumos, é reconhecida como extremamente dependente da presença de material orgânico (BOCKHEIM e GENNADIYEV, 2000), situação que pode ser verificada nesta pesquisa. Ocorre que os dados deixam evidente que horizontes superficiais, de coloração escura, devido a presença de material orgânico, são compostos principalmente por grumos associados à blocos, associados à presença de microplásticos.

Os resultados apontam para a existência de microplásticos, principalmente fibras (forma alongada), dentro dos agregados do solo de diferentes formatos. Diferentemente dos resultados apontados por esta pesquisa e pelo trabalho de Zhang e Liu (2018), Lehmann *et al.* (2021) concluíram que as fibras afetaram negativamente a formação de agregados em comparação com partículas de outras formas. No entanto, efeitos positivos da presença de microplásticos na evolução do solo também podem ser reconhecidos (RILLIG *et al.*, 2019). Um desses efeitos positivos é a diminuição da densidade do solo (MACHADO *et al.*, 2018), o que pode significar maior infiltração, diminuindo o escoamento superficial.

Sendo a agregação do solo é afetada por diversas características ambientais, como a quantidade e tipo de matéria orgânica, bem como pelos aspectos químicos e mineralógicos, faz-se necessário buscar explicar como ocorre a interação entre o solo e os microplásticos. Sabe-se que elementos antrópicos ricos em carbonato da construção civil e presentes no solo do Villa-Lobos podem contribuir para elevar o pH do solo afetando positivamente sua agregação (MOREL *et al.*, 2015). Porém, a capacidade de sorção de microplásticos no solo tende a diminuir à medida que o pH do solo aumenta (LU *et al.*, 2020).

Assim, é possível que os solos no Villa-Lobos ao longo do processo de agregação, incorporem os microplásticos, de modo que eles fiquem presos no interior dos agregados. No entanto, apesar de presentes dentro de agregados, e portanto, serem parte da estrutura, plásticos em micro escala também podem causar efeitos negativos no solo (MACHADO *et al.*, 2018). Os microplásticos podem ser ingeridos por minhocas (HE *et al.*, 2018) e gerar distúrbios no

metabolismo lipídico (CHEN *et al.*, 2022). foram encontradas evidências de que alguns tipos de materiais, como poliestireno e polietileno, tendem a contribuir para o aumento do pH do solo (ZHAO *et al.*, 2021).

Com uma possível diminuição da atividade biológica dos anelídeos, devido à presença de microplásticos do tipo polietileno, como demonstrado por Cao *et al.* (2017) a concentração de matéria orgânica no solo pode ser afetada e por consequência no processo de agregação. Além de polietileno, já foi demonstrado que *Enchytraeus crypticus* pode ingerir micropartículas de nylon, como as existentes no Villa-Lobos, e sofrer efeitos tóxicos afetando seu desenvolvimento (LAHIVE *et al.*, 2019).

A presença e degradação do polietileno no solo também afeta negativamente a comunidade microbiana (HUANG *et al.*, 2021). Apesar de serem compostos por cerca de 80% de carbono (RILLIG *et al.*, 2021), os microplásticos podem modificar e afetar negativamente o desempenho dos microrganismos do solo (RILLIG e BONKOWSKI, 2018; MACHADO *et al.*, 2018), que são fundamentais para a agregação e outros processos pedogenéticos. Desta forma, a presença de microplásticos no solo pode afetar negativamente a agregação ao influenciar o conteúdo de matéria orgânica, seja por modificações no desenvolvimento radicular, seja por diminuição da atividade macro e microbiana do solo.

Como constatado pelo RAMAN, os microplásticos possuem pigmentos, e sabe-se que esses pigmentos e outros aditivos podem comprometer o desenvolvimento de fungos (LIWARSKA-BIZUKOJC *et al.*, 2021). Fungos micorrízicos são importantes para a agregação do solo, principalmente para a formação de grumos, portanto os microplásticos podem afetar negativamente e indiretamente sua formação. Além disso, de acordo com Feng *et al.* (2022) diversos tipos de microplásticos possuem em sua composição metais potencialmente tóxicos, que podem ser liberados na matriz do solo afetando os microrganismos.

Além de alterar a agregação do solo ao afetarem os fungos micorrízicos, os microplásticos também podem interagir com os minerais de argila. A presença de poliéster no interior da agregados do solo, como foi encontrado nos blocos, tem sido associado ao teor de argila e ao tipo de argilomineral (ZHANG *et al.*, 2022). Nesse sentido, Luo *et al.* (2020) mostraram que óxidos, com destaque para goethita e a magnetita têm maior capacidade de sorção de microplásticos do que os argilominerais como caulinita e montmorilonita.

No caso estudado, goethita, magnetita, caulinita e montmorilonita foram descritas a partir de DRX, e em todos os horizontes com esses óxidos e argilominerais, houve a identificação de microplásticos, principalmente fibras. Apesar dessa associação, e dos indícios

de modificações causadas pelos microplásticos na agregação, é possível que a quantidade de microplásticos nos solos do Villa-Lobos não seja suficiente para indicar alterações mais perceptíveis como as indicadas pela literatura.

#### 6.4 - Relações entre metais potencialmente tóxicos e agregação em solos construídos

Assim como relatado por Silveira et al. (2003), o presente estudo demonstrou correlação positiva entre os valores de Cd e Pd e os teores de argila. Assim, possivelmente as características de determinadas camadas de materiais alóctones estão atuando na retenção de metais potencialmente tóxicos. Considerando o horizonte 9 do perfil 1, nota-se que o valor de Cd foi de  $1,8 \text{ mg kg}^{-1}$  em horizonte que além de conter elevada quantidade de carbono ( $12,5 \text{ g kg}^{-1}$ ), também contém elevada quantidade de argila ( $363 \text{ g kg}^{-1}$ ).

Tal relação entre metais potencialmente tóxicos e teores de argila e MO ficou evidente principalmente em horizontes subsuperficiais de aspecto maciço, com expressiva presença não apenas de argila, mas também de matéria orgânica, como no caso dos perfis 1 e 2. Porém, a presença de metais potencialmente tóxicos não é sinônimo de falta de estruturas. No perfil 2, por exemplo, o maior valor de Cr está associado a estruturas em blocos e granulares, em pH alcalino, ou seja, o processo de agregação no solo ocorre, mesmo com a presença de metais potencialmente tóxicos.

Pela constatação de que há horizontes com elevado conteúdo de metais potencialmente tóxicos descritos como maciços, mas outros que são formados por agregados, uma hipótese é levantada para explicar a coexistência de metais potencialmente tóxicos e agregados do solo. Em certa concentração, quando não elevada, metais potencialmente tóxicos podem interagir com material orgânico e argila sem afetar negativamente a formação e a estabilidade de agregados. Nesse caso, os metais potencialmente tóxicos ficam adsorvidos pela material orgânica e pela argila por adsorção interna (STRAWN, 2021), mas como sua concentração é baixa, há ainda a formação de agregados.

Evidências indicam que associação entre metais potencialmente tóxicos e matéria orgânica diminui à medida que se considera agregados maiores (DENG *et al.*, 2018). Como sugerido por Cui *et al.* (2016) a matéria orgânica existente em microagregados do solo, devido a sua elevada área superficial, possui alta capacidade de formar ligações com os metais potencialmente tóxicos. Ainda nesse cenário, é possível que os agregados formados nos solos do Villa-Lobos, devido ao seu tamanho, permitem a interação entre matéria orgânica e metais potencialmente tóxicos, mas não conseguem reter todo o metal.

Assim, considerando que os metais não estão sendo totalmente adsorvidos, eles tendem a ficarem propensos a lixiviação dentro dos perfis, alcançando assim, horizontes mais profundos. Como demonstrado por Kicińska *et al.* (2021) o pH do meio afeta a adsorção de metais e sua mobilidade, de modo que em pH elevado, como os do Villa-Lobos, a tendência é

a diminuição da interação entre metais, solo e planta, permitindo precipitação e mobilidade para horizontes mais profundos.

Porém, é importante colocar que os metais potencialmente tóxicos podem também estar sendo transportados em profundidade pelas raízes de gramíneas, como foi descrito previamente em Zacchini *et al.* (2009). De todo modo, de acordo com Yong e Phadungchewit (1993) e Wang *et al.* (2015), ao alcançarem horizontes, com argilominerais montmorilonita, que foi descrita em vários horizontes dos solos do Villa-Lobos, os metais ficam sujeitos à retenção,

Apesar de os níveis de metais não demonstrarem níveis alarmantes em relação aos valores de referências, a presença de Cd, Pd e Cr pode afetar a atividade microbiana do solo, como demonstrado por Fließbach *et al.* (1994) e Tang *et al.* (2022), incluindo a presença fúngica (MA *et al.*, 2022; SARWAR *et al.*, 2017; FERROL *et al.*, 2016). Uma vez modificada a atividade microbiana, a tendência é que ocorra alteração no potencial do solo em suportar certos tipos de vegetação (SILVA *et al.*, 2015), pois microrganismos promovem a circulação de nutrientes no solo (FIERER, 2017).

Sendo a vegetação e toda a atividade microbiana peças fundamentais na agregação do solo, o fato de haver potenciais alterações em suas dinâmicas pode afetar o processo de agregação no solo em certos horizontes. Por fim, é importante ressaltar que os efeitos da presença de metais potencialmente tóxicos no solo do parque podem persistir por muito tempo no ambiente, pois metais são elementos não degradáveis facilmente por processos biológicos ou físicos, sendo liberados lentamente e por longo período de tempo no solo (SUMAN *et al.*, 2018).



## 6.5 - Contribuição dos solos construídos em áreas urbanas no estoque de carbono

A emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por atividade antrópica têm contribuído para o aumento do efeito estufa. Por consequência, pode haver elevação de temperatura no planeta. As alterações no uso da terra são uma das principais fontes de emissão de CO<sub>2</sub>. Concomitante ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, o mundo tem presenciado o crescimento de áreas urbanas, o que contribui para alterações ambientais, incluindo nos solos. O solo, por sua vez, é considerado o maior reservatório de carbono, dentre os ecossistemas terrestres (KIRSCHBAUM, 2000).

Diferente do maior reservatório de carbono, os oceanos, que se tornam acidificados pela absorção de CO<sub>2</sub>, os solos são capazes de utilizar o CO<sub>2</sub> em benefício da população microbiana que nele vive (LAFFOLEY et al., 2017), e que são fundamentais para garantir a saúde do solo e a prestação de serviços ambientais. Desse modo, a quantidade de CO<sub>2</sub> expressa pelo estoque de carbono apresenta papel chave na indicação da qualidade dos serviços ambientais prestados pelos solos (NEL et al., 2022).

Assim, o desconhecimento sobre o papel que os solos construídos, como os do parque Villa-Lobos, reflete na ignorância sobre a saúde desses solos e seu papel ecológico, como foi colocado por trabalhos prévios dedicados aos solos de áreas urbanas (KIRSCHBAUM, 2000). Dentro do ciclo biogeoquímico do carbono, o solo tem capacidade de armazenar aproximadamente quatro vezes mais carbono do que a biomassa vegetal por ele suportada e mais que três vezes do conteúdo de carbono da atmosfera (WATSON, 2000). O sequestro de carbono pelos solos ocorre pela humificação, agregação e sedimentação (LAL, 1997).

A humificação é a decomposição, ou transformação dos resíduos vegetais e animais que leva à formação de húmus, um componente rico em carbono e mais estável no ambiente, e portanto, mais resistentes a ações microbianas, o que torna longa a permanência do carbono no solo (LAL, 1997). Ainda segundo o citado autor, a agregação do solo, como observada nos solos do Villa-Lobos, está associada à atividade dos agentes edáficos que ocasionam a floculação e a cimentação das partículas, processos capazes de aprisionar compostos orgânicos. Como já citado, além da humificação e agregação, a sedimentação de compostos orgânicos no solo também age como processo capaz de manter carbono no solo.

A pesquisa demonstra que a capacidade de estocar carbono no solo também está associada a fatores antrópicos, uma vez que as ações humanas alteram os processos de humificação, agregação e sedimentação. Atualmente, 3% da superfície do planeta é considerada artificializada (HONG *et al.*, 2022) incluindo porções de solos de ambientes urbanos. Pesquisas precedentes sinalizam que solos de áreas urbanas estão se tornando cada vez mais críticos no

ciclo global do carbono (ZHANG *et al.*, 2021). Em solos altamente modificados pela ação humana, como os solos de áreas urbanas, o estoque de carbono pode aumentar ou diminuir dependendo, por exemplo, do uso da terra, do tipo de solo, e do clima, mas principalmente da quantidade de carbono armazenada antes da conversão da área em ambiente urbano (POUYAT *et al.*, 2003).

Considerando os solos estudados no Villa-Lobos, os resultados demonstram que os perfis de solos construídos são capazes de estocar carbono de acordo com uma associação de fatores, que incluem o uso da terra e características naturais do solo. Ficou evidente que a natureza do material rico em carbono no horizonte 9 do perfil 1 contribui para o elevado estoque de carbono nesse horizonte ( $634,2 \text{ mg ha}^{-1}$ ), mesmo que nele tenham sido introduzidos materiais de origem antrópica.

Por meio dos resultados obtidos, incluindo não apenas estoque de carbono, mas também a descrição morfológica dos solos, levanta-se a hipótese de que a variação do estoque de carbono, em profundidade, deve estar relacionada com a sobreposição dos depósitos antrópicos existentes no parque. De acordo com Vasenev *et al.* (2013), a história de uma população influencia diretamente o estoque de carbono em subsuperfície devido às modificações de uso da terra ao longo do tempo. Também há indícios de possível correlação entre o uso da terra, ao longo do tempo, e a densidade dos solos, como sinal de atividades que levaram à compactação. No Brasil a densidade acima de  $1,85 \text{ cm}^{-3}$ , valor próximo de horizontes descritos como maciços no parque Villa-Lobos, indica compactação (REINERT *et al.*, 2008). Desse modo, os dados apontam que horizontes mais densos, devido ao uso da terra, tendem a possuir menor estoque de carbono.

O estudo demonstra que os solos de áreas urbanas, mesmo que construídos de modo aleatório, têm potencial para sequestrar carbono atmosférico. Percebe-se ainda que a gestão do carbono em solos construídos em cidades pode fomentar práticas gerais para melhorar a qualidade físico-química e a saúde desses solos. Como colocado por Nero *et al.* (2017), solos mesmo quando degradados fisicamente em profundidade, podem ser manejados em superfície por meio da construção de um horizonte rico em material orgânico e de boa drenagem. Assim, os autores pontuam que tornam-se esses solos um ambiente de extrema importância no armazenamento de carbono. Estudos prévios de Gemitzi *et al.* (2021), já comprovou que em ambientes urbanos, o solo recoberto por gramíneas, como no Villa-Lobos, tende a apresentar correlação positiva significativa com o estoque de carbono. Porém, os autores destacam ainda que locais de vegetação mais proeminente, como florestas urbanas, essa correlação é maior.

## 6.6 - Influência da formação de agregados na dinâmica hídrica

Os resultados demonstram que a ocorrência de agregação em um solo previamente degradado reflete em modificações em importantes propriedades do solo ao longo do tempo. A existência de um sistema poroso bem definido, como indicado pelo MLT e pela micromorfologia, inclui a presença de canais que interligam horizontes, como no perfil 3, onde o sistema poroso escaneado conecta os três primeiros horizontes.

A porosidade formada entre os agregados, como citado acima, segundo Jangorzo *et al.* (2013), afeta o fluxo de água e gás em solos modificados, alterando seu processo evolutivo. Os poros podem afetar a infiltração e a capacidade hidráulica e conseqüentemente o processo de expansão e contração do solo (XU *et al.*, 2021). Além disso, como disse Prado *et al.* (2016), a conexão do horizonte, como indicado pelo MLT e micromorfologia, pode indicar a condição ambiental para a sobrevivência da macrofauna.

Horizontes, descritos em campos, como formados apenas por blocos, como é o caso do horizonte 3 do perfil 3, apresentaram altos valores de condutividade hidráulica. No caso do horizonte 3 do perfil 3 a condutividade hidráulica foi de  $2,47 \text{ cm h}^{-1}$ , demonstrando boa correlação entre este tipo agregado e esta variável, situação relatada anteriormente por Tanner *et al.* (2021). Por outro lado, em horizontes formados por associação granular e blocos, observou-se variabilidade da condutividade hidráulica, o que pode ser explicado por uma possível menor grau de estabilidade dos grânulos, o que pode refletir em maior quantidade de material capaz de obstruir os poros, diminuindo a passagem de água. Como citado, estruturas granulares normalmente contêm mais fração de areia do que os blocos, o que também pode contribuir com a obstrução do sistema poroso do solo, ao haver a quebra desses agregados.

Além das características do solo, os materiais antrópicos presentes nos perfis podem explicar o comportamento da água em profundidade (MOREL *et al.*, 2015; CLUNES *et al.*, 2022). A presença de materiais de construção no perfil 2, por exemplo, pode explicar a variabilidade do comportamento de infiltração e condutividade hidráulica em subsuperfície. Assim, por exemplo, o horizonte 8 do perfil 2, composto por grãos soltos e com vários volumes formados por materiais antrópicos apresentou  $1,38 \text{ cm h}^{-1}$ , enquanto que o horizonte subsequente, maciço, em campo, apresentou maior condutividade hidráulica ( $2,54 \text{ cm h}^{-1}$ ).

Além da solução primária que infiltra, que pode ser entendida como sendo principalmente a água da chuva, é importante ressaltar sua interação com os componentes do solo. No caso estudado provavelmente ocorre a criação de uma nova solução a partir dessa interação, e essa solução secundária utiliza as fissuras dos horizontes como canais preferenciais

de percolação, como demonstrado por Huot *et al.* (2015), tornando-se parte importante para a evolução dos solos ao longo do tempo (JANGORZO *et al.* 2013; LEGUÉDOIS *et al.*, 2016).

Percebe-se que ao longo dos últimos 30 anos, agregados, principalmente nos formatos de grânulos e blocos, afetam positivamente a condutividade hidráulica. Esses agregados são possivelmente resultados da interação física e química entre os constituintes típicos do solo, como matéria orgânica e argilominerais, e materiais antrópicos, como os ricos em carbonatos. Nota-se, além disso, que a condutividade hidráulica nos três perfis é afetada por horizontes sem estruturas (grãos soltos e maciças).

Apesar da associação positiva entre a presença de estruturas descritas em campo e a condutividade hidráulica, observa-se casos como do horizonte 9 do perfil 2. Esse campo em campo foi descrito como maciço, mas apresenta, segundo o MLT, o desenvolvimento de estruturas, o que pode estar condicionando o valor de condutividade hidráulica (2,54 cm<sup>h-1</sup>). Outros horizontes que não foram escaneados mas foram descritos como maciço no campo, como é o caso do horizontes 8 do perfil 1, podem também estar em processo de desenvolvimento de estruturas. No caso do horizontes 8 do perfil 1 o valor de condutividade foi de 4,00 cm<sup>h-1</sup>.

## 7 – Considerações finais

A pesquisa confirmou as hipóteses que foram levantadas a partir da literatura sobre os solos alterados. Em macro e micro escala ficou claro que os solos, mesmo que após profundas modificações, estão sob a ação de processos pedogenéticos. O movimento evolutivo dos solos modificados ocorre pela associação entre características físicas, químicas e mineralógicas dos diversos componentes que o formam. Entre esses materiais de origem há solo alóctone e artefatos antrópicos. Na interface das interações entre esses materiais, o processo de agregação e estabilização de estruturas ocorre.

A formação de estrutura em solo em questão de décadas desempenha um papel crucial na potencialização dos serviços ecossistêmicos dos solos de áreas urbanas. A estruturação do solo favorece a infiltração, ajudando a prevenir inundações e melhorando a gestão das águas nas áreas urbanas, assim cria-se ambientes urbanos mais sustentáveis, saudáveis e resilientes para as comunidades, melhorando a qualidade de vida.

A existência de processos pedogenéticos concomitantes ao desenvolvimento de estruturas pode ocorrer de modo direto e associativo com os materiais antrópicos presentes em diversas escalas. Essa afirmação significa que agregados de solos podem conter material antrópico em seu interior. Com essa constatação, a pesquisa endossa conclusões de trabalhos anteriores que apontaram que o papel dos artefatos, como os microplásticos, precisa ser mais explorado nas pesquisas científicas.

Além disso, não apenas plásticos afetam a evolução do solo. Devido a liberação de metais potencialmente tóxicos que interagem com argilominerais e óxidos, outros objetos, como cerâmicas, podem enriquecer a matriz de solo com determinados grupos de elementos que naturalmente não ocorreriam nesse solo. Justamente pelas diversas possibilidades de evolução de solos, em consequência do comportamento dos materiais que o formam, é possível o surgimento de um sistema poroso de característica variada, comparando os horizontes entre si.

Especificamente no caso estudado, as variações morfológicas dos perfis refletem em variabilidade no comportamento hídrico. Porém, apesar disso, horizontes de solos alterados podem criar conectividade entre si, o que reflete em transporte de material entre eles. Com isso, ao longo do tempo, pode haver o condicionamento de melhora do fluxo hídrico e de gases em profundidade.

Assim, mesmo que tenha sido criado em ambiente degradado pela ação humana, os solos do parque Villa-Lobos exemplificam que em ambientes densamente urbanizados, como

a cidade de São Paulo, os solos são importantes atores. Eles podem afetar positivamente o ciclo hidrológico de áreas urbanas, contribuindo para maior infiltração. Além disso, são valiosos ao nos permitir perceber diversas consequências das ações antrópicas em um componente da paisagem corriqueiramente esquecido dentro das áreas urbanas - o solo.

## Referências

- ABREU, M.F.; ABREU, C.A.; J.C.; ANDRADE. Determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, ferro, manganês, zinco, níquel, cádmio, cromo e chumbo em ácido nítrico usando métodos da US - EPA. In: RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais. Instituto Agronômico, 2001. 285 pag.
- ADDERLEY, W.P.; WILSON, C.A.; SIMPSON, I.A.; DAVIDSON, D.A. Chapter 26 - Anthropogenic Features. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Ed.): Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition), Elsevier, 2018.
- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A.E. Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma*, v. 262, p.101-111, jan. 2016. Elsevier.
- ALAOUI, A.; ROGGER, M.; PETH, S.; BLÖSCHL, G. Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, v.557, p.631–642. 2018.
- ALMAJMAIE, A.; HARDIE, M.; ACUNA, T.; BIRCH, C. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability. *Soil Tillage Res.*, 167 (2017), pp. 39-45, 10.1016/J.STILL.2016.11.003
- ALMEIDA, H.A. *Climatologia aplicada à Geografia*. 2016
- ALMEIDA, B.G.; VIANA, J.H.M.; TEIXEIRA, W.G.; DONAGEMMA, K. Densidade do Solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). *Manual de métodos de análises de solos*. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017a. cap. 7.
- ANDERSON, N.P.; HART, J.M.; SULLIVAN, D.M.; CHRISTENSEN, N.W.; HORNECK, D.A.; PIRELLI, G.J. 2013. Applying lime to raise soil pH for crop production (Western Oregon). EM9057. Oregon State University Extension Service.
- ANGERS, D.A.; MEHUYS, G.R. Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 69, n. 2, p.373-380, maio 1989. Canadian Science Publishing.
- ANGULO, S.C.; JOHN, V.M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. In: IX Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Foz do Iguaçu, 2002. Anais...
- ARNOLD, R.W. Concepts of soils and pedology. In: WILDING, L.P; SMECK, N.E; HALL, G.F. (Ed.). *Pedogenesis and soil taxonomy: I. Concepts and interactions*. Amsterdam: Elsevier Science. p.1-21. 1983
- AVANZI, J.C.; NORTON, L.D.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; OLIVEIRA, A.H.; SILVA, M.A. Aggregate stability in soils cultivated with Eucalyptus. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.46, n.1, p.89-96, jan. 2011 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000100012>
- AZEVEDO, A.C; VIDAL-TORRADO, P. Esmectita, vermiculita, minerais com hidróxi entrecamadas e clorita. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F, editores. *Química e mineralogia do solo: Parte I - Conceitos básicos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2009. p.381-426.
- BARNHISEL, R.I.; BERTSCH, P.M. 1989. Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite and smectite. *Minerals in soil environments*, 1, 729-788.
- BASTOS, R.S.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ, V.H.; CORRÊA, M.M.; COSTA, L.M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 1, p.21-31, fev. 2005.
- BEYER, L.; BLUME, H.; ELSNER, D.; WILLNOW, A. Soil organic matter composition and microbial activity in urban soils. *Science of the total environment*, v. 168, n. 3, p.267-278, jun. 1995. Elsevier.

- BIDWELL, D.W.; HOLE, F.D. Man as a factor of soil formation. *Soil Science*, v. 99, n. 1, p.65-72, jan. 1965. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health).
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. In BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. (Ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*; Chapter 14; Soil Science Society of America: Madison, Wisconsin, p.377–382. 2002.
- BLUM, W.H. Functions of Soil for Society and the Environment. *Reviews. Environmental Science And Bio/technology*, v. 4, n. 3, p.75-79, ago. 2005. Springer Nature.
- BOCKHEIM, J.G.; GENNADIYEV, A.N. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, v. 95, n. 1-2, p.53-72, mar. 2000. Elsevier.
- BOUMA, J. Measuring the Hydraulic Conductivity of Soil Horizons with Continuous Macropores. *Soil Science Society Of America Journal*, v. 46, n. 2, p.438-441. 1982.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. *Elementos da Natureza e propriedades do solo (3ª Edit.)*. Bookman. Tradução por LEPSCH, I.F. 2012, 716p.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v.124, p.3-22. 2005.
- BÜKS, F.; KAUPENJOHANN, M. (2020). Global concentrations of microplastics in soils—a review. *Soil*, 6(2), 649-662.
- BULLOCK, P., N. FEDOROFF, A. JONGERIUS, G. STOOPS, T. TURSINA, e U. BABEL. 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Waine. Research Publication, Wolverhampton. 152p., 1985.
- BULLOCK, P.; GREGORY, P.J (1991). Soils: a neglected resource in urban areas. In: BULLOCK, P.; GREGORY, P.J. (Eds.). *Soils in the urban environment*, p. 1–5. Blackwell Scientific Publications, Oxford, Great Britain.
- BUOL, S.W., HOLE, F.D., MCCRACKEN, R.J., 1973. *Soil Genesis and Classification*. The Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- BURGHARDT, W. Soils in urban and industrial environments. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, v. 157, n. 3, p.205-214, 1994. Wiley.
- BURT, R. (Ed.) (2004) *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Laboratory Investigations Report No. 42, USDA-NRCS, National Soil Survey Center, Lincoln.
- BUSSAB, W.; de O.; MORETTIN, P. A. *Estatística básica*. 5ªed. 2017. Artmed
- CAO, D.; XIAO, W.; LUO, X.; LIU, G.; ZHENG, H. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 61 (2017), p. 12148. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/61/1/012148/meta>
- CAPECHE, C.L. *Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista*. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2008. 6 p.
- CAPRA, G.F.; GANGA, A.; GRILLI, E.; VACCA, S.; BUONDONNO, A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. *Journal of Soils and Sediments*, v. 15, n. 7, p.1602-1618, 18 mar. 2015. Springer Nature.
- CAPUTO, H.P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. LTC- Livros técnicos e científicos. Editora S.A. Rio de Janeiro, 1988, 6ªEd. Revista e Ampliada, 234p.
- CARLOS, A. F. A. *O Espaço Urbano: Novos Escritos sobre a Cidade*. São Paulo: FFLCH, 2007, 123p.
- CARREIRO, M.M.; HOWE, K.; PARKHURST, D.F.; POUYAT, R.V. Variation in quality and decomposability of red oak leaf litter along an urban-rural gradient. *Biology And Fertility Of Soils*, v. 30, n. 3, p.258-268, 10 dez. 1999. Springer Nature.
- CASTRO, S.S. de. *Micromorfologia de Solos: bases para descrição de lâminas delgadas*, 2ª Edição, UNICAMP, Campinas, Goiânia, 135p., 2008.
- CASTRO, S.S. de; COOPER, M.; SANTOS, M.C.; VIDALTORRADO, P. *Micromorfologia do solo: bases e aplicações*. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA,



- J.M. de; LOPES, A.S.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.107-164. 2003
- CHAUVEL, A. Iniciação à Análise Microscópica dos Solos. Piracicaba: ESALQ/USP, 1979. 16p.
- CHEN, H.L.; SELVAM, S.B.; TING, K.N.; TSHAI, K.Y.; GIBBINS, C.N. Relative contributions of different local sources to riverborne microplastic in a mixed landuse area within a tropical catchment, *Environmental Research*, Volume 210, 2022, 112972, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112972>.
- CHEN, P. 1977, Table of key lines in X-ray powder diffraction patterns of minerals in clays and associated rocks: *Indiana Geological Survey Occasional Paper 21*, 67 p., 1 table, 21 app.
- CHEN, Y.; DAY, S.D.; WICK, A.F.; MCGUIRE, K.J. Influence of urban land development and subsequent soil rehabilitation on soil aggregates, carbon, and hydraulic conductivity. *Science of the Total Environment*. Volumes 494–495, 1 October 2014, Pages 329-336
- CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*. v. 52, n. 3, p.345-353, set. 2001. Wiley.
- CHURCHMAN, G.J.; WHITTON, J.S.; CLARIDGE, G.G.C.; THENG, B.K.G. 1984. Intercalation method using formamide for differentiating halloysite from kaolinite. *Clays and clay minerals*, 32(4), 241-248.
- CINTRA, F.L.D. Disponibilidade de água no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. Piracicaba: ESALQ/USP, 1997. 90p. Tese Doutorado
- CLAESSENS, M.; VAN CAUWENBERGHE, L.; VANDEGEHUCHTE, M. B.; JANSSEN, C. R. New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. *Mar. Pollut. Bull.* 2013, 70 (1–2), 227–233
- CLUNES, J.; VALLE, S.; DÖRNER, J.; MARTÍNEZ, O.; PINOCHET, D.; ZÚÑIGA, F.; BLUM, W.E.H. Soil fragility: A concept to ensure a sustainable use of soils, *Ecological Indicators*, Volume 139, 2022, 108969, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108969>.
- COSTA, A.C.S.; BIGHAM, J.M. Óxidos de Ferro. In: MELO, V.F., ALLEONI, R.F, editores. *Química e mineralogia do solo*. Viçosa: SBSCS, 2009. Cap. Parte 1, p. 505-572
- COUTINHO, J.M.V. 1980. Carta geológica da região metropolitana da Grande São Paulo. São Paulo, EMPLASA, mapa geológico, 1:100000, 2 fl.
- CRAUL, P.J. Urban soils. In: *Fifth Conference of the Metropolitan Tree Improvement Alliance*, 1985, Pensilvânia. *Anais. Pensilvânia: The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania*, 1985. p.23-24.
- CUI, H., MA, K., FAN, Y.; PENG, X.; MAO, J.; ZHOU, D.; ZHANG, Z.; ZHOU, J. Stability and heavy metal distribution of soil aggregates affected by application of apatite, lime, and charcoal. *Environ Sci Pollut Res* 23, 10808–10817 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6271-7>
- DANIELSON, E.R.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. *Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 2006, p.443-478.
- DECAGON DEVICES (2016). Mini disk infiltrometer. User's Manual – version 1.4, 16p.
- DEEB, M., DESJARDINS, T., PODWOJEWSKI, P., PANDO, A., BLOUIN, M., AND LERCH, T.Z. Interactive effects of compost, plants and earthworms on the aggregations of constructed Technosols. *Geoderma*, 305, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.014>, 2017.

- DEEB, M.; GRIMALDI, M.; LERCH, T.Z.; PANDO, A.; PODWOJEWSKI, P.; BLOUIN, M. Influence of Organic Matter Content on Hydro-Structural Properties of Constructed Technosols. *Pedosphere*, v. 26, n. 4, p.486-498, ago. 2016. Elsevier.
- DENEF, K.; J. SIX, R.; MERCKX, K. PAUSTIAN. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant Soil* 246:185–200.
- DENG Y.F., YUE X.B., LIU S.Y., CHEN Y.G., AND ZHANG D.W. 2015. Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution. *Engineering Geology*, 193: 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.018>
- DENG, A.; WANG, L.; CHEN, F.; LI, Z.; LIU, W.; LIU, Y. Soil aggregate-associated heavy metals subjected to different types of land use in subtropical China, *Global Ecology and Conservation*, Volume 16, 2018, e00465, ISSN 2351-9894, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00465>.
- DEXTER, A.R. A statistical measure of the structure of tilled soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*. v. 22, n. 1, p.101-104, 1977.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil And Tillage Research*, v. 11, n. 3-4, p.199-238, jun. 1988. Elsevier.
- DEXTER, A.R. Shapes of aggregates from tilled layers of some Dutch and Australian soils. *Geoderma*, v. 35, n. 2, p.91-107, jun. 1985. Elsevier.
- DICK, D.P; SCHWERTMANN, U. Microaggregates fromoxisols and inceptisols: dispersion through selective dissolutionsand physicochemical treatments. *Geoderma*, Amsterdam,v. 74, p. 49-63. 1996.
- DITZLER, C.; SCHEFFE, K.; MONGER, H.C. (Eds.). Soil survey manual. Soil Science Division Staff. USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C., 2017.
- DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Y.; VELÁSQUEZ, E.; ZANGERLÉ, A.; LAVELLE, P.; GUTIÉRREZ-EISMAN, S.; JIMÉNEZ, J.J. 2020. Unveiling the age and origin of biogenic aggregates produced by earthworm species with their NIRS fingerprint in a subalpine meadow of Central Pyrenees. *PLOS ONE* 15(8): e0237115. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237115>
- DONAGEMMA, G.K.; VIANA, J., H.M. Argila dispersa em água e grau de floclulação. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Ed.). *Manual de métodos de análises de solos*. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. cap.11.
- DUIKER, S.W.; RHOTON, F.E.; TORRENT, J.; SMECK, N.E.; LAL, R. Iron (Hydr)Oxide Crystallinity Effects on Soil Aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 67, p. 606-611. 2003.
- ECK, D.V.; HIRMAS, D.R.; GIMÉNEZ, D. Quantifying Soil Structure from Field Excavation Walls using Multistripe Laser Triangulation Scanning. *Soil Science Society Of America Journal*, v. 77, n. 4, p.1319-1328, 2013. Soil Science Society of America.
- ECK, D.V.; QIN, M.; HIRMAS, D.R.; GIMÉNEZ, D.; BRUNSELL, N.A. Relating Quantitative Soil Structure Metrics to Saturated Hydraulic Conductivity. *Vadose Zone Journal*, v. 15, n. 1, p.1-11, 2016. Soil Science Society of America.
- EDWARDS, A.P.; BREMNER, J.M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. *Journal of Soil Science*, v. 18, n. 1, p.47-63, mar. 1967. Wiley.
- EMERSON, W.W. The structure of soil crumbs. *Journal of Soil Science*, v. 10, n. 2, p.235-244, set. 1959. Wiley.
- ESWARAN, H.; SYS, C.; SOUSA, E.C. 1975. Plasma infusion—a pedological process of significance in the humid tropics. *An. Edafol. Agrobiol.* 34 (9 – 10), 655 – 674

- FAGUNDES, P.R.S.; Gomes, C.B.; Matuk, T.T.; Szarfarc, S.C. Aproveitamento dos resíduos gerados no entreposto terminal de São Paulo da Ceagesp. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 42, n. 3, p. 65-75, maio/jun. 2012.
- FARAHANI E., EMAMI H., KELLER T., FOTOVAT A., AND KHORASANI R. 2018. Impact of monovalent cations on soil structure. Part I. Results of an Iranian soil. *Int. Agrophys.*, 32, 57-67.
- FENG, X.; WANG, Q.; SUN, Y.; ZHANG, S.; WANG, F. 2022. Microplastics change soil properties, heavy metal availability and bacterial community in a Pb-Zn-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127364.
- FERNÁNDEZ-UGALDE, O.; BARRÉ, P.; HUBERT, F.; VIRTO, I.; GIRARDIN, C.; FERRAGE, E.; CHENU, C. Clay mineralogy differs qualitatively in aggregate-size classes: clay-mineral-based evidence for aggregate hierarchy in temperate soils. *European Journal of Soil Science*, v. 64, n. 4, p. 410 - 422. 2013.
- FERROL, N., TAMAYO, E., AND VARGAS, P. 2016. The Heavy Metal Paradox in Arbuscular Mycorrhizas: from Mechanisms to Biotechnological Applications. *J. Exp. Bot.* 67 (22), 6253–6265. doi:10.1093/jxb/erw403
- FIERER, N. 2017. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nat. Rev. Microbiol.* 15, 579–590. doi: 10.1038/nrmicro.2017.87
- FIORIN, T. T. Estimativa de infiltração de água no solo a partir de pedofunções. 2008, 166f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- FLIEßBACH, A.; MARTENS, R.; REBER, H.H. (1994). Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge. *Soil Biol Biochem* 26: 1201–1205.
- FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono Orgânico. In: Teixeira, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). *Manual de métodos de análises de solos*. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. cap.1.
- FONTÃO, P. A. B.; ZAVATTINI, J. A.; SHERIDAN, S. C.; ARMOND, N. B. 2018. GÊNESE DAS CHUVAS EM SÃO PAULO (SP): ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A “SPATIAL SYNOPTIC CLASSIFICATION” E A “ANÁLISE RÍTMICA EM CLIMATOLOGIA”. *Revista Brasileira de Climatologia*, 23.
- FORDHAM, A. 1990. Weathering of biotite into dioctahedral clay minerals. *Clay Minerals*, 25(1), 51-63. doi:10.1180/claymin.1990.025.1.06
- FOURVEL, G.; Vidal-Beaudet, L.; Bocq, A.; Brochier, V.; Théry, F.; Landry, D.; Kumarasamy, T.; Cannavo, P. Early structural stability of fine dam sediment in soil construction. *Journal of Soils and Sediments*, v. 18, p. 2647-2663. 2018.
- FURQUIM, S A.C. 2002. Interações entre modelado e solo no transecto Espreado, São Pedro, SP. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.8.2002.tde-01082005-105035. Recuperado em 2022-10-10, de [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)
- GALÁN, E. 2006. Genesis of clay minerals. *Developments in clay science*, 1, 1129-1162.
- GAUTHIER, T.D. Detecting Trends Using Spearman's Rank Correlation Coefficient. *Environmental Forensics*, v. 2, n. 4, p. 359-362. 2001.
- GEE, G.W.; OR, D. (2002) Particle Size Analysis. In: Dane, J.H. and Topp, G.C., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, 255-293.
- GEE, G.W; DANI, OR. Particle-size Analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1986, p.331-362.
- GEMITZI, A.; ALBARAKAT, R.; KRATOUNA, F.; LAKSHMI, V. Land cover and vegetation carbon stock changes in Greece: A 29-year assessment based on CORINE and

- Landsat land cover data, *Science of The Total Environment*, Volume 786, 2021, 147408, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147408>.
- GIMÉNEZ, D.; KARMON, J.L.; POSADAS, A.; SHAW, R.K. Fractal dimensions of mass estimated from intact and eroded soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, v. 64, n.1-2, p.165-172. 2002
- GONÇALVES, A.D.M.A; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 5, p.1174-1184, out. 2013.
- GREGORY, A.S.; RITZ, K.; MCGRATH, S.P.; QUINTON, J.N.; GOULDING, K.W.T.; JONES, R.J.A.; HARRIS, J.A.; BOL, R.; WALLACE, P.; PILGRIM, E.S.; WHITMORE, A.P. (2015), A review of the impacts of degradation threats on soil properties in the UK. *Soil Use Manage*, 31: 1-15. <https://doi.org/10.1111/sum.12212>
- GREINERA, L.; KELLERA, A.; GRÊT-REGAMEYB, A.; PAPRITZC, A. Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy*, v. 69, p.224-237, 2017.
- GUHRA, T.; STOLZE, K.; TOTSCHKE, K.U. 2022. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 164, 108483.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E; TATHAM, R.L; BLACK, W.C. Análise Multivariada de dados. Trad. Adonai Schulp Sant'Anna e Anselmo Chaves Neto. 5ªed. Porto Alegre: Bookman, 593p, 2005.
- HARTEMINK, A.E.; MINASNY, B. Towards digital soil morphometrics. *Geoderma*, v. 230-231, p.305-317, out. 2014. Elsevier.
- HE, D.; LUO, Y.; LU, S.; LIU, M.; SONG, Y.; LEI, L. (2018). Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 109. [10.1016/j.trac.2018.10.006](https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006).
- HE, H.; JI, S.; TAO, Q.; ZHU, J.; CHEN, T.; LIANG, X.; DONG, H. 2017. Transformation of halloysite and kaolinite into beidellite under hydrothermal condition. *American Mineralogist*, 102(5), 997-1005.
- HIDALGO-RUZ, V.; LARS GUTOW, L.; THOMPSON, R.C.; THIEL, M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environ. Sci. Technol.*2012, 46, 3060-3075
- HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 413p.
- HILLEL, D. *Soil and Water, Physical Principles and Processes*. Academic Press, New York, USA, 1971, 288p.
- HIRMAS, D.R.; GIMENEZ, D.; MOME FILHO, E.A.; PATTERSON, M.; DRAGER, K.; PLATT, B.F.; ECK, D.V. 2016. Quantifying soil structure and porosity using three-dimensional laser scanning. In: Hartemink, A.E.; Minasny, B. (Ed.). *Digital soil morphometrics*, pp. 19-35.
- HIRMAS, D.R.; GIMÉNEZ, D.; SUBROY, V.; PLATT, B.F. Fractal distribution of mass from the millimeter- to decimeter-scale in two soils under native and restored tallgrass prairie. *Geoderma* s 207–208(1):121-130 October 2013
- HOLLIS, J.M.: 1991, The classification of soils in urban areas, in BULLOCK, P.; GREGORY, P.J. (Eds). *Soils in the Urban Environment*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 1-4.
- HONG, Y.; CHEN, Y.; CHEN, S.; SHEN, R.; HU, B.; PENG, J.; WANG, N.; GUO, L.; ZHUO, Z.; YANG, Y.; LIU, Y.; MOUAZEN, A.; SHI, Z. Data mining of urban soil spectral library for estimating organic carbon. *Geoderma*, 426, 2022, [10.1016/j.geoderma.2022.116102](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116102).
- HUANG, D.; XU, Y.; LEI, F.; YU, X.; OUYANG, Z.; CHEN, Y.; JIA, H.; GUO, X. DEGRADATION of polyethylene plastic in soil and effects on microbial community

- composition, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 416, 2021, 126173, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126173>.
- HUOT, H.; SIMONNOT, M.; WATTEAU, F.; MARION, P.; YVON, J. Early transformation and transfer processes in a Technosol developing on iron industry deposits. *European Journal of Soil Science*, Wiley, 2014, v.65, pp.470-484.
- HUOT, H.; SIMONNOT, M.O; MOREL, J.L. Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials. *Soil Science*, v. 180, n. 4/5, p.182-192, 2015. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health).
- IBGE – Instituto brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: síntese de indicadores 2010. Rio de Janeiro: IBGE. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.
- IBGE. Manual técnico de pedologia: guia prático de campo / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. - Rio de Janeiro: IBGE, 2015.134 p.
- INDA JUNIOR, A.V.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; BOENI, M.; SALTON, J.C.; TONIN, A.T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.5, p.1301-1307, set-out, 2007.
- INSAM, H.; HASELWANDTER, K. Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. *Oecologia*, v. 79, n. 2, p.174-178, 1989. Springer Nature America, Inc.
- IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
- JACKSON, M. L. 195). Frequency distribution of clay minerals in major great soil groups as related to the factors of soil formation. *Clays and Clay Minerals*, 6(1), 133-143.
- JANGORZO NS, SCHWARTZ C, WATTEAU F (2014) Image analysis of soil thin sections for a non-destructive quantification of aggregation in the early stages of pedogenesis. *Eur J Soil Sci* 65:485–498
- JANGORZO, N.S.; WATTEAU, F.; SCHWARTZ, C. Evolution of the pore structure of constructed Technosols during early pedogenesis quantified by image analysis. *Geoderma*, v. 207-208, p.180-192, out. 2013. Elsevier BV.
- JANSSEN, R.P.T.; BRUGGENWERT, M.G.M.; VAN RIEMSDIJK, W.H. Effect of Al hydroxide polymers on cation exchange of montmorillonite. *Eur J Soil Sci*. 2003;54:335-45. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00516.x>
- JENERETTE, G. D.; WATTEAU, F.; SCHWARTZ, C. Ecosystem services and urban heat riskscape moderation: water, green spaces, and social inequality in Phoenix, USA. *Ecol. Appl*, v.21, p.2637-2651, 2011.
- JOIMEL, S.; SCHWARTZ, C.; AUCLERC, A.; BEL, J.; BRANCHU, P.; CHENOT, E.D.; CONSALÈS, J.N.; HEDDE, M.; MAGNUS, B.; MOREL, J.L.; CORTET, J. 2014. Soil invertebrates as bioindicators of soil quality in urban vegetable gardens. Proc. Global Soil Biodiversity Initiative, Dijon, France.
- JOLICOEUR, S.; ILDEFONSE, P. ; BOUCHARD, M. 2000. Kaolinite and gibbsite weathering of biotite within saprolites and soils of central Virginia. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1118-1129.
- KAMPF, N.; CURTI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. eds. *Química e Mineralogia do Solo*. Viçosa, Mg, SBCS, 2009.
- KARATHANASIS, A.D.; W.G. HARRIS. 1994. Quantitative thermal analysis of soil materials. In: J.E. Amonette and L.W. Zelazny, editors, *Quantitative methods in soil mineralogy*. SSSA Misc. Publ. SSSA, Madison, WI. p. 360–411.

- KAY, B. D. Soil structure and organic carbon: a review. *Soil processes and the carbon cycle*, p. 169-197, 2018.
- KICÍŃSKA, A.; POMYKAŁA, R.; IZQUIERDO, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*. 73. e13203. 10.1111/ejss.13203.
- KIRSCHBAUM, M.U.F. 2000. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming'? *Biogeochemistry* 482-51.
- KLUTER, A. (1965) Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Soil. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, p.210-221.
- KOHLER, A.; ABBASPOUR, K.C.; FRITSCH, M.; SCHULIN, R. Using Simple Bucket Models to Analyze Solute Export to Subsurface Drains by Preferential Flow. *Vadose Zone Journal*, v.2 , n.1, p.68-75, 2003.
- KOME, G.; ENANG, R.; TABI, F.; YERIMA, B. 2019. Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: A Review. *Open Journal of Soil Science*, 9, 155-188. doi: 10.4236/ojss.2019.99010.
- KUMARI, N.; MOHAN, C. "Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties" In *Clay and Clay Minerals*, edited by Gustavo Nascimento. London: IntechOpen, 2021. 10.5772/intechopen.97672
- LADEIRA, F.B.C. A ação antrópica sobre os solos nos diferentes biomas brasileiros-terras indígenas e solos urbanos. *Entre-Lugar, Dourados, MS*, ano 3, n. 6, p.127-139, 2012.
- LAFFOLEY, D.; BAXTER, J.M.; TURLEY, C.; LAGOS, N.A., (editors). 2017. An introduction to ocean acidification: What it is, what we know, and what may happen. IUCN, Gland, Switzerland, 24 pp.
- LAHIVE, E.; WALTON, A.; HORTON, A.A.; SPURGEON, D.J.; SVENDSEN, C. Microplastic particles reduce reproduction in the terrestrial worm *Enchytraeus crypticus* in a soil exposure. *Environ Pollut.* 2019 Dec;255(Pt 2):113174. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113174.
- LAL, R. "Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy". *Soil Science Society of America Journal*, 1985.
- LAL, R. Soil processes and greenhouse effect. In: Lal, R.; Blum, W. H.; Valentine, C.; Stewart, B. A. (Ed.). *Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 199-212. (*Advances in Soil Science*, 9).
- LAL, R.; Stewart, B.A. *Urban Soil*, CRC Press, 2017, 406p.
- LARUCCIA, M.A.F. Parques urbanos e a cidade de São Paulo: o Parque Estadual Villa Lobos - Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo - São Paulo, 2004. 205 p
- LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J.C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; GRIMALDI, M.; JIMENEZ, J.J.; VELASQUEZ, E.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. *Acta Oecol.* 2020;105:103561. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103561>
- LEGUÉDOIS, S.; SÉRÉ, G.; AUCLERC, A.; CORTET, J.; HUOT, H.; OUVREARD, S.; WATTEAU, F.; SCHWARTZ, C.; MOREL, J. L. Modelling pedogenesis of Technosols. *Geoderma*, v. 262, p.199-212, jan. 2016. Elsevier.
- LEHMANN, A.; LEIFHEIT, E.F.; GERDAWISCHKE, M.; RILLIG, M.C. Microplastics have shape- and polymerdependent effects on soil aggregation and organic matter loss – an experimental and meta-analytical approach. *Micropl.&Nanopl.* 1, 7 (2021). <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00007-x>
- LETEY, J., 1991. The study of soil structure-science or art. *Soil Res.* 29 (6), 699–707.

- LI, Y.; XU, J.; HU, J.; ZHANG, T.; WU, X.; YANG, Y. 2022. "Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin Play a Crucial Role in Soil Aggregate Stability in Pb-Contaminated Soil" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19, no. 9: 5029. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095029>
- LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. Editora Universidade de São Paulo. 2005, 335p.
- LIMA, L.R.S. *Dragagem, Transporte e deposição final de sedimentos de leito de rio. Estudo de caso: calha do Rio Tietê - fase II. Dessertação*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008.
- LIN, Z.; HUANG, Z.G.; LIAO, D.L.; HUANG, W.; HUANG, J.; DENG, Y. 2022. Effects of soil organic matter components and iron aluminum oxides on aggregate stability during vegetation succession in granite red soil eroded areas. *Journal of Mountain Science* 19(9). <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7185-5>
- LIU, S., YANG, B., LIANG, Y., XIAO, Y., AND FANG, J. (2020). Prospect of phytoremediation combined with other approaches for remediation of heavy metal-polluted soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (14), 16069–16085. doi:10.1007/s11356-020-08282-6
- LIWARSKA-BIZUKOJC E. Effect of (bio)plastics on soil environment: A review. *Sci Total Environ.* 2021 Nov 15;795:148889. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148889. Epub 2021 Jul 7. PMID: 34328943.
- LÖDER M.G.J., GERDTS G. (2015) Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics—A Critical Appraisal. In: BERGMANN M., GUTOW L., KLAGES M. (Ed.): *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham
- LOFRANO, F.C. *Escoamento em meios porosos:um modelo analítico não darciano baseado no Princípio da Entropia Máxima*. 2018, 235pg. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- LU, X.; LU, P.; LIU, X. Fate and abundance of antibiotic resistance genes on microplastics in facility vegetable soil, *Science of The Total Environment*, Volume 709, 2020, 136276, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136276>.
- LUO, Y.; ZHANG, Y.; XU, Y.; GUO, X.; ZHU, L. Distribution characteristics and mechanism of microplastics mediated by soil physicochemical properties. *Sci Total Environ.* 2020 Jul 15;726:138389. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138389. Epub 2020 Apr 1. PMID: 32305754.
- MA, S.; QIAO, L.; LIU, X.; ZHANG, S.; ZHANG, L.; QIU, Z.; YU, C. Microbial community succession in soils under long-term heavy metal stress from community diversity-structure to KEGG function pathways, *Environmental Research*, Volume 214, Part 2, 2022, 113822, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113822>.
- MACHADO, A.A.; KLOAS, W.; ZARFL, C.; HEMPEL, S.; RILLIG, M.C. 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biol.* 24, 1405–1416. <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>.
- MADRID, F. ROMERO, A.S.; MADRID, L. MAQUEDA, C. Reduction of availability of trace metals in urban soils using inorganic amendments. *Environmental Geochemistry and Health* volume 28, p.365–373 (2006)
- MALLA, P.B. 1978. Vermiculite. In: *Sedimentology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Berlin, Heidelberg . [https://doi.org/10.1007/3-540-31079-7\\_248](https://doi.org/10.1007/3-540-31079-7_248)
- MANDELBROT, B.B. *The fractal geometry of nature*. New York W.H Freeman. 1983. 468p.
- MCKINLEY, J.M.; WORDEN, R.H.; & RUFFELL, A.H. 1999. Smectite in sandstones: a review of the controls on occurrence and behavior during diagenesis. *Clay mineral cements in sandstones*, 109-128.
- MEA, 2005. *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being 5*. Island Press Washington, DC.

- MILLÁN, H.; ORELLANA, R. 2001. Mass fractal dimensions of soil aggregates from different depths of a compacted Vertisol. *Geoderma*, 101, 65-76.
- MIRANDA-TREVINO, J.C.; COLES, C.A. 2003. Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH. *Applied Clay Science*, 23(1-4), 133-139.
- MIRKOS, A.A.W. 1992. Biodynamics of the landscape: biopedological organization and functioning. Part 1: role and contribution of the soil fauna to the organization and dynamics of a pedological cover in Botucatu, state of São Paulo, Brazil. In: International Scientific Conference IFOAM "Organic agriculture, a key to a sound development and a sustainable environment", 9, São Paulo, Proceedings, 74-86.
- MOLINEUX, C.J.; FENTIMAN, C.H.; GANGE, A.C. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. *Ecological Engineering*, v. 35, n. 10, p.1507-1513, out. 2009. Elsevier.
- MOREL, J. L, SCHWARTZ C, FLORENTIN L, DE KIMPE C. Urban soils. In: HILLEL, D. (Ed.): *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier Ltd., Academic Press, London, p.202-208, 2005.
- MOREL, J. L., CHENU, C., LORENZ, K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, v. 15, n. 8, p. 1659-1666, 2015.
- MOURA, M. C. S.; LOPES, A. N. C.; MOITA, G. C.; MOITA NETO, J. M. Estudo multivariado de solos urbanos da cidade de Teresina. *Química Nova*, v.29, n.3, p.429-435, jun. 2006.
- MUGGLER, C.C.; VAN GRIETHUYSEN, C.; BUURMAN, P.; PAPE, T. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisoil from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science*, Baltimore, v. 164, p. 759-770, 1999.
- MURPHY, C.P. Thin section preparation of soils and sediments. Rothamsted: A.B. Academic Publishers, 1986, 149p.
- MUSIELOK, L.; DREWNIK, M.; STOLARCZYK, M.; STOLARCZYK, M.; BARTKOWIAK, S.; KOŻYCZKOWSKI, K.; LASOTA, J.; LASOTA, A.; SZCZECHOWSKA, K.; WĄTŁY, M. Rates of anthropogenic transformation of soils in the Botanical Garden of Jagiellonian University in Kraków (Poland). *Catena*, v. 170, p. 272-282, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.023>.
- NEL, L.; BOENI, A.F.; PROHÁSZKA, V.J.; SZILÁGYI, A.; TORMÁNÉ KOVÁCS, E.; PÁSZTOR, L.; CENTERI, C. InVEST Soil Carbon Stock Modelling of Agricultural Landscapes as an Ecosystem Service Indicator. *Sustainability* 2022, 14, 9808. <https://doi.org/10.3390/su14169808>
- NERO, B.F.; CALLO-CONCHA, D.; ANNING, A.; DENICH, M. Urban Green Spaces Enhance Climate Change Mitigation in Cities of the Global South: The Case of Kumasi, Ghana, *Procedia Engineering*, Volume 198, 2017, Pages 69-83, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.074>.
- NIKIFOROFF, C.C. Morphological classification of soil structure. *Soil Science*, v.52, n.3, p.193-212, 1941.
- NIMMO, J.R., 2004, Aggregation: Physical Aspects, in HILLEL, D. (Ed.): *Encyclopedia of Soils in the Environment*: London, Academic Press.
- NOLASCO M.C. 2002. Registros geológicos gerados pelo garimpo. Lavras Diamantinas - Bahia. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 316p.
- NIMMO, J.R; PERKINS, K.S. Aggregate Satability and Size Distribution. In: DANE, J.H.; TOPP, C G.(Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 4 – Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. p.317-328, 2002.
- NORRA, S.; CHENG, Z. Urban Soil Contamination. In: LEVIN, M.J.; KIM, K.J.; MOREL, J.L.; BURGHARDT, W.; CHARZYNSKI, P.; SHAW, R.K. *Soils within Cities* Global



- approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment. IUSS Working Group SUITMA. 2017. 253p.
- NOVÁK, T.J.; BALLA, D.; KAMP, J. Changes in anthropogenic influence on soils across Europe 1990–2018, *Applied Geography*, Volume 124, 2020, 102294, ISSN 0143-6228, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102294>.
- NUELLE, M.T.; DEKIFF, J.H.; REMY, D.; FRIES, E., 2014. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environ. Pollut.* 184, 161–169.
- OADES, J.M. E.; WATERS, S.G. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.*, v.29, p.815-828, 1991.
- OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, v.76, p.319-337, 1984.
- OKOFFO, ELVIS D.; O'BRIEN, STACEY; RIBEIRO, FRANCISCA; BURROWS, STEPHEN D.; TOAPANTA, TANIA; RAUERT, CASSANDRA; O'BRIEN, JAKE W.; TSCHARKE, BENJAMIN J.; WANGA, XIANYU; THOMAS, KEVIN V. Plastic particles in soil: state of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 2021,23, 240-274.
- PACHEPSKY, Y.A.; GIMÉNEZ, D.; CRAWFORD, J.W.; RAWLSA, W.J. Conventional and fractal geometry in soil science. *Developments in Soil Science*, v.27, p. 7-18, 2000.
- PAUL, R.; KARTHIKEYAN, K.; VASU, D.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P. 202). Origin and mineralogy of nano clays of Indian Vertisols and their implications in selected soil properties. *Eurasian Soil Science*, 54(4), 572-585.
- PÉREZ, D.V.; BREFIN, M.L.M.; POLIDORO, J.C. Solo, da origem da vida ao alicerce das civilizações: uso, manejo e gestão. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.51, n.9, p.1-4, 2016
- PINTO, T. P. Reaproveitamento de resíduos de construção. *Revista Projeto*, n. 98, p. 137-138, 1987.
- POUYAT, R.; GROFFMAN, P.; YESILONIS, I.; HERNANDEZ, L. “Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems,” *Environ. Pollut.* v. 116, p.107–118, 2002.
- POUYAT, R.V. The urban-rural gradient: an opportunity to better understand human influences on forest soils. In: *Annual convention - Proceedings of the society of american foresters*, 1990, Washington. *Anais.Washington: Soc. of Am. Foresters*, 1991. p. 212–218.
- POUYAT, R.V., J. RUSSELL-ANELLI, I.D. YESILONIS, AND P.M. GROFFMAN. 2003. Soil carbon in urban forest ecosystems. p. 347-362. In: KIMBLE, J.M.; HEATH, S.A.; BIRDSEY, R.A.; LA1, R. (ed.) *The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- POUYAT, R.V.; SZLAVECZ, K.; YESILONIS, I.D.; GROFFMAN, P.M.; SCHWARZ, K. Chemical, Physical, and Biological Characteristics of Urban Soils. In: AITKENHEAD-PETERSON, J.; VOLDER, A. (Ed). *Urban Ecosystem Ecology*. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc. 2010. Cap.7, p.119-152.
- PRADO, R.B.; FIDALGO, E.C.C.; MONTEIRO, J.M.G.; SHULER, A.E.; VEZZANI, F.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, A.P.; VIANA, J.H.M.; PEDREIRA, B.C.C.G.; MENDES, I.C.; REATTO, A.; PARRON, L.M.; CLEMENTE, E.P.; DONAGEMMA, G.K.; TURETTA, A.P.D.; SIMÕES, M. 2016. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. *Pesq Agropec Bras* 51, 1021-1038. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900002>
- PUSKÁS, I.; FARSANG, A. 2009. Diagnostic indicators for characterizing urban soils of Szeged, Hungary. *Geoderma*, 148(3-4), 267-281.
- R CORE TEAM. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- RADFORD, FREYA; ZAPATA-RESTREPO, LINA M.; HORTON, ALICE A.; HUDSON, MALCOLM D.; SHAWB, PETER J.; WILLIAMS, IAN D. Developing a systematic method for extraction of microplastics in soils. *Anal. Methods*, 2021,13, 1695-1705. <https://doi.org/10.1039/D0AY02086A>
- RANSOM, M.D.; BIGHAM, J.M.; SMECK, M.E.; JAYNES, W.F. 1988. Transitional vermiculite-smectite phases in Aqualfs in southwestern Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 873-880.
- REINERT, D.; ALBUQUERQUE, J.; REICHERT, J.; AITA, C.; ANDRADA, M. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online]. 2008, v. 32, n. 5. 10.1590/S0100-06832008000500002.
- RIEDER, M.; CAVAZZINI, G.; D'YAKONOV, Y.S.; FRANK-KAMENETSKII, V.A.; GOTTARDI, G.; GUGGENHEIM, S.; WONES, D.R. 1998. Nomenclature of the micas. *Clays and clay minerals*, 46(5), 586-595.
- RILLIG MC, LEIFHEIT E, LEHMANN J. Microplastic effects on carbon cycling processes in soils. *PLoS Biol.* 2021;19(3):e3001130. Published 2021 Mar 30. doi:10.1371/journal.pbio.3001130
- RILLIG, M.C., LEHMANN, A., DE SOUZA MACHADO, A.A. AND YANG, G. (2019), Microplastic effects on plants. *New Phytol*, 223: 1066-1070. <https://doi.org/10.1111/nph.15794>
- RILLIG, M.C.; BONKOWSKI, M. Microplastic and soil protists: A call for research. *Environ Pollut.* 2018 Oct;241:1128-1131. doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.147. Epub 2018 Jun 20. PMID: 30029321; PMCID: PMC6485376.
- ROBERT, M. 1973. The experimental transformation of mica toward smectite; relative importance of total charge and tetrahedral substitution. *Clays and clay minerals*, 21(3), 167-174.
- ROCHA, F.N.; SUAREZ, P.A.Z.; GUIMARÃES, E.M. Argilas e suas Aplicações em Utensílios e Materiais Cerâmicos. *Rev. Virtual Quim.*, 2014, 6 (4), 1105-1120
- ROKIA, S.; SÉRÉ, G.; SCHWARTZ, C.; DEEB, M.; FOURNIER, F.; NEHLS, T.; DAMAS, O.; VIDAL-BEAUDET, L. Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. *Waste Management*, v.34, n.11, p.2155-2162, nov. 2014. Elsevier.
- ROSSITER, D.G. 2007. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources (5 pp). *Journal of Soils and Sediments*, 7(2), 96-100.
- RUEDRICH, J.; BARTELSSEN, T.; DOHRMANN, R.; SIEGESMUND, S. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environ Earth Sci* 63, 1545–1564 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0767-0>
- RUELLAN, A. A história dos solos: alguns problemas de definição e de interpretação. *Geografia*, v.10, n.19, p.183-191, 1985.
- RUIZ, F.; SARTOR, L.R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; SANTOS, J.C.B.; FERREIRA, T.O. Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (SE-Brazil), *Geoderma*, Volume 374, 2020, 114439, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114439>.
- RYAN, P.C.; HUERTAS, J. Reaction pathways of clay minerals in tropical soils: insights from kaolinite-smectite synthesis experiments. *Clays and Clay Minerals* 2013;; 61 (4): 303–318. doi: <https://doi.org/10.1346/CCMN.2013.0610410>
- SALTON, J.C.; SILVA, W.M.; TOMAZI, M.; HERNANI, L.C. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Ed.). *Manual de métodos de análises de solos*. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017b. cap.13.

- SALTON, J.C.; SILVA, W.M.; TOMAZI, M.; HERNANI, L.C. Determinação da agregação do solo - Metodologia em uso na EMBRAPA Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico 184. Dourados, dezembro de 2012.
- SANTOS, H.G. dos; CAMARGO, M.N.; LARACH, J.O.I.; JACOMINE, P.K.T.; CARVALHO, A.P. de. Definição e notação de horizontes e camadas do solo. 1983. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS. 34p.
- SANTOS, P.G.; ALMEIDA, J.A.; SEQUINATTO, L. Mineralogy of the Clay Fraction and Chemical Properties of Soils Developed from Sedimentary Lithologies of Pirambóia, Sanga-the-Cabral and Guará Geological Formations in Southern Brazil. *Division - Soil Processes and Properties • Rev. Bras. Ciênc. Solo* 41 • 2017 • <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160344>
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 7. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, 170p.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.; ANJOS, A.; OLIVEIRA, V.; LUMBRERAS, L.; COELHO, M.; ALMEIDA, J.; ARAÚJO FILHO, A.; OLIVEIRA, J.; CUNHA, T. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.
- SARWAR, N.; IMRAN, M.; SHAHEEN, M. R.; ISHAQUE, W.; KAMRAN, M. A.; MATLOOB, A., REHIM, A.; HUSSAIN, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere* 171, 710–721. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.116
- SCALENGHE, R.; FERRARIS, S. The First Forty Years of a Technosol. *Pedosphere*, v.19, n.1, p.40-52, fev. 2009. Elsevier.
- SCHAETZL, R.J.; ANDERSON, S. Soil: Genesis and geomorphology. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 2005.
- SCHARENBRUCHA, B.C.; LOYDA, J.E.; JOHNSON-MAYNARD, J.L. Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties. *Pedobiologia*, v.49, n.4, p.283-296, ago. 2005. Elsevier.
- SCHOENEBERGER, P.J.; WYSOCKI, D. A.; BENHAM, E.C; SOIL SURVEY STAFF. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National. Soil Survey Center, Lincoln, NE. Benham, and Soil Survey Staff, 2012, 300p.
- SCHUELER, T. The compaction of urban soils. Technical note nº107. *Watershed Protection Techniques*, v.3, n.2, p.661-665, 2000.
- SÉRÉ, G.; OUVARD, S.; MAGNET, V.; PEY, B.; MOREL, J.L; SCHWARTZ, C. Predictability of the Evolution of the Soil Structure using Water Flow Modeling for a Constructed Technosol. *Vadose Zone Journal*, v.11, n.1, p.1-13, 2012. Soil Science Society of America.
- SÉRÉ, G.; SCHWARTZ, C.; OUVARD, S.; RENAT, J.C.; WATTEAU, F.; VILLEMEN, G.; MOREL, J.L. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *Journal of Soils and Sediments*, v.10, n.7, p.1246-1254, 21 mar. 2010. Springer Nature.
- SHARMA, A.; SHARMA, R.K. Effect of addition of construction–demolition waste on strength characteristics of high plastic clays. *Innov. Infrastruct. Solut.* 4, 27 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0216-1>
- SILVA, M. A. P.; MACEDO, D. A.; ANDRADE, J. C. S.; SILVA, J. B.; PASKOCIMAS, C. A.; DUTRA, R. P. S. Estudo da matéria-prima do pólo cerâmico de Santo Antônio do Potengi (RN) visando sua aplicação em cerâmica artística. *Cerâmica Industrial (Impresso)*, v. 16, p. 21-24, 2011. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/587657457f8c9d6e028b479b> Acesso em: 24 fev. 2021.

- SILVA, L.J.R.; LAURINDO, L. K.; KORMANN, S.; DE LUCENA, E.O.; DA SILVA, S.I.A.; SOUZA, T. 2020. 6. Ciclagem de nutrientes, dinâmica da matéria orgânica, manutenção da estrutura do solo e sua influência na produção primária líquida.
- SILVA, S.D.S.; GOMES, M.D.S.; GALLO, A.D.S.; MERCANTE, F.M.; BATISTOTE, M.; DA SILVA, R.F. 2015. Bioindicadores de qualidade do solo cultivado com milho em sucessão a adubos verdes sob bases agroecológicas. Embrapa Agropecuária Oeste-Artigo em periódico indexado (ALICE).
- SILVEIRA, M.L.A.; ALLEONI, L.R.F.; GUILHERME, L.R.G. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*. 2003, v. 60, n. 4, pp. 793-806. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000400029>
- SIMONSON, R.W., 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23, 152 – 156
- SIX, J.; BOSSUYT, H. DEGRYZE, S. DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, v.79, p.7-31, 2004.
- SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T. E COMBRINK, C. Soil Structure and Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal*, v. 64, n. 2, p.681-689, 2000. Soil Science Society of America.
- SIX, J.C.; FELLER, K.; DENEFF, S.M.; OGLE, J.C. Soil Organic Matter, Biota and aggregation in temperate and tropical soil – effects of no-tillage. *Agronomie*, v. 22, p.755-775, 2002.
- SODANO, M.; SAID-PULLICINO, D.; FIORI, A. F.; CATONI, M.; MARTIN, M.; CELI, L. 2016. Sorption of paddy soil-derived dissolved organic matter on hydrous iron oxide-vermiculite mineral phases. *Geoderma*, 261, 169-177.
- SOIL SURVEY STAFF. 1993. Soil Survey Manual. USDA, Soil Conservation Service, Agricultural Handbook No. 18, U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C. 503p.
- STEVENSON, F.J. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2. ed. John Wiley, New York, USA. 496p.
- STOCH, L.; SIKORA, W. Transformations of Micas in the Process of Kaolinitization of Granites and Gneisses. *Clays Clay Miner.* 24, 156–162 (1976). <https://doi.org/10.1346/CCMN.1976.0240402>
- STOOPS, G., Proposal for the micromorphological description of crystalline and microcrystalline minerals in soil thin sections. In press.1980.
- STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America, Madison. (2003).
- STRAWN, D.G. 2021. "Sorption Mechanisms of Chemicals in Soils" *Soil Systems* 5, no. 1: 13. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010013>
- STROGANOVA, M.N.; AGARKOVA, M.G. Urban soils: experimental study and classification (exemplified by soils of Southwestern Moscow). *Eurasian Soil Science*, v.25, n.3, p.59-69, 1993.
- STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil, *Soil and Tillage Research*, Volume 161, 2016, Pages 71-78, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.005>.
- SUMAN, J. ; UHLIK, O. ; VIKTOROVA, J. ; MACEK , T. Phytoextraction of heavy metals: a promising tool for clean-up of polluted environment? *Front. Plant Sci.*, 9 (2018), p. 1476. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01476>
- TANG, W.; PEI, Y.; ZHENG, H.; ZHAO, Y.; SHU, L.; ZHANG, H. 2022. Twenty years of China's water pollution control: Experiences and challenges. *Chemosphere* 295, 133875. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133875
- TANNER, S.; KATRA, I.; ARGAMAN, E.; BEN-HUR, M. Mechanisms and processes affecting aggregate stability and saturated hydraulic conductivity of top and sublayers in

- semi-arid soils, *Geoderma*, Volume 404, 2021, 115304, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115304>.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). *Manual de métodos de análises de solos*. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017.
- THOMAS, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475-490. In J.M. Bigham (ed.). *Methods of soil analysis: Part 3-chemical methods*. Soil Science Society of America Book Series No. 5. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI.
- THOMAS, G.W. Historical Developments in Soil Chemistry: Ion Exchange. *Soil Science Society Of America Journal*, v.41, n.2, p.230-238, 1977.
- TIFAFAI, M.; BOUZOUIDJA, R.; LEGUÉDOIS, S.; OUVRARDA, S.; SÉRÉ, G. How lysimetric monitoring of Technosols can contribute to understand the temporal dynamics of the soil porosity. *Geoderma*, v.296, p.60-68, jun. 2017. Elsevier.
- TISDALL, J.M; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal Of Soil Science*, v.33, n.2, p.141-163, jun. 1982. Wiley.
- TOSCHE, K. U.; AMELUNG, W.; GERZABEK, M. H.; GUGGENBERGER, G.; KLUMPP, E.; KNIEF, C.; LEHNDORFF, E.; MIKUTTA, R.; PETH, S.; PRECHTEL, A.; RAY, N.; KOGEL-KNABNER, I. Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v.181, n.1, p.104-136, ago. 2017. Wiley.
- TURK, J.K.; GRAHAM, R.C. "Distribution and Properties of Vesicular Horizons in the Western. United States" (2011). Conservation and Survey Division. 157.
- UGWU, I.; IGBOKWE, O. "Sorptions of Heavy Metals on Clay Minerals and Oxides: A Review" In *Advanced Sorption Process Applications*, edited by Serpil Edebalı. London: IntechOpen, 2019. 10.5772/intechopen.80989
- VAN GENUCHTEN, M.T.H.; D.R. NIELSEN. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys*, v.3, p.615–628, 1985.
- VASENEV, V.; KUZUYAKOV, Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors. *Land Degradation & Development*, v.29, n.6, p.1607-1622, 30 abr. 2018. Wiley.
- VASENEV, V.I., STOORVOGEL, J.J., VASENEV, I.I., VALENTINI, R. How to map soil organic carbon stocks in highly urbanized regions? *Geoderma*, v.226-227, p.103-115, ago. 2014. Elsevier.
- VASENEV, V.I.; VAN OUDENHOVEN, A.P.E.; ROMZAYKINA, O.N.; HAJIAGHAEVA, R.A. The Ecological Functions and Ecosystem Services of Urban and Technogenic Soils: from Theory to Practice (A Review). *Eurasian Soil Science*, v.51, n.10, p.1119-1132, out. 2018. Pleiades Publishing Ltd.
- VASENEV, V.; STOORVOGEL, J.; VASENEV, I. Urban soil organic carbon and its spatial heterogeneity in comparison with natural and agricultural areas in the Moscow region. *Catena* 107 (2013) 96–102. 10.1016/j.catena.2013.02.009
- VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.175-180, 1994
- VIANA, J.H.M.; FERNANDES FILHO, E.I.; SCHAEFER, C.E.G.R. 2004. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos. *R. Bras. Ci. Solo* 28, 11–19. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100002>
- VIRTO, I.; GARTZIA-BENGOETXEA, N.; FERNÁNDEZ-UGALDE, O. Role of Organic Matter and Carbonates in Soil Aggregation Estimated Using Laser Diffractometry, *Pedosphere*, Volume 21, Issue 5, 2011, Pages 566-572, ISSN 1002-0160, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60158-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60158-6).
- WANG, Q.; LIU, X.; WANG, C.; ZHANG, X.; LI, H.; CHEN, T.; HOU, Y.; CHEN, X.; LIANG, X. Solubilization Effect of Surfactants on Morphological Transformation of

- Cadmium and Pyrene in Cocontaminated Soils. *Water Air Soil Pollut.* 226, 1–9. doi:10.1007/s11270-015-2409-3
- WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N. H.; VERARDO, D. J.; DOKKEN, D. J.; Land Use, Land-Use Change and Forestry: A Special Report of the IPCC, Cambridge University Press: Cambridge, 2000
- WATTEAU F.; HUOT H.; SÉRÉ, G.; BEGIN, J.C.; REES, F.; SCHWARTZ, C.; MOREL, J.L. Micropedology to reveal pedogenetic processes in Technosols. *SJSS. SPANISH JOURNAL OF SOIL SCIENCE YEAR 2018 VOLUME 8 ISSUE 2.*
- WATTEAU, F.; JANGORZO, N. S.; SCHWARTZ, C. A micromorphological analysis for quantifying structure descriptors in a young constructed Technosol. *BOL. SOC. GEOL. MEX.* v.71, n.1, p.11-20, 2019.
- WEBER, C.J. Plastics in soil description and surveys - practical considerations and field guide. *Front. Soil Sci.*, 18 July 2022. Sec. Soil Pollution & Remediation. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.917490>
- WEST, S.L.; WHITE, G.N.; DENG, Y.; MCINNES, K.J.; JUO, A.S.R.; Dixon, J.B. 2004. Kaolinite, halloysite, and iron oxide influence on physical behavior of formulated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1452-1460.
- WHITE, C.S., MCDONNELL, M.J., 1988. Nitrogen cycling processes and soil characteristics in an urban versus rural forest. *Biogeochemistry*, n. 5, p.243-262.
- WILSON, M. J. 1999. The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives. *Clay minerals*, 34(1), 7-25.
- WOLD, S; ESBENSEN, K; GELADI, P. Principal Component Analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v.2, p.37-52, 1987.
- WU, M.; YANG, C.; DU, C.; LIU, H. (2020). Microplastics in waters and soils: Occurrence, analytical methods and ecotoxicological effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, 110910 - 110910.
- XIE, H.; LI, J.; ZHANG, B.; WANG, L.; WANG, J.; HE, H.; ZHANG, X. Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates. *Sci Rep* 5, 14687 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep14687>
- XU, J.; LI, Y.; REN, C.; WANG, S.; VANAPALLI, S.K.; CHEN, G. Influence of freeze-thaw cycles on microstructure and hydraulic conductivity of saline intact loess, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 181, 2021, 103183, ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103183>.
- YAN, B.; LI, J.; XIAO, N.; QI, Y.; FU, G.; LIU, G.; QIAO, M. Urban-development-induced Changes in the Diversity and Composition of the Soil Bacterial Community in Beijing. *Scientific Reports*, v.9, n.6.
- YANG, J.; ZHANG, G. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, v.61, n.1, p.30-46, 17 abr. 2015. Informa UK Limited.
- YONG, R.N.; PHADUNGCHWIT, Y. pH influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 30(5): 821-833. <https://doi.org/10.1139/t93-073>
- YOUNG, I. M.; CRAWFORD, J. W. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *Journal of Soil Science*, v.42, n.2, p.187–192, 1991.
- ZACCHINI, M.; PIETRINI, F.; SCARASCIA MUGNOZZA, G.; IORI, V.; PIETROSANTI, L.; MASSACCI, A. Metal Tolerance, Accumulation and Translocation in Poplar and Willow Clones Treated with Cadmium in Hydroponics. *Water Air Soil Pollut* 197, 23–34 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9788-7>

- ZHANG, G.S.; LIU, Y.F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China, *Science of The Total Environment*, Volume 642, 2018, Pages 12-20, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>.
- ZHANG, H.; HUANG, Y.; AN, S.; ZHU, Z. A Review of Microplastics in Soil: Distribution Within Pedosphere Compartments, Environmental Fate, and Effects. *Water Air Soil Pollut* 233, 380 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05837-w>
- ZHANG, Z.; WANG, Y.; SUN, H.; QI, L.; LIU, H.; WANG, Z. Spatial variation and distribution of soil organic carbon in an urban ecosystem from high-density sampling, *CATENA*, 204, 2021, [10.1016/j.catena.2021.105364](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105364).
- ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of American Journal*, v.61, n.4, p.1024-1030, 1997.
- ZHAO, T.; LOZANO, Y.M.; RILLIG, M.C. Microplastics Increase Soil pH and Decrease Microbial Activities as a Function of Microplastic Shape, Polymer Type, and Exposure Time. *Frontiers in Environmental Science*, v.9, 2021, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.675803>.
- ZHOU, W.; SUN, X.; LI, S.; DU, T.; ZHENG, Y.; FAN, Z. 2021. Effects of organic mulching on soil aggregate stability and aggregate binding agents in an urban forest in Beijing, China. *Journal of Forestry Research*. 33. [10.1007/s11676-021-01402-z](https://doi.org/10.1007/s11676-021-01402-z).
- ZHU, W.-X., CARREIRO, M.M. Chemoautotrophic nitrification in acidic forest soils along an urban-to-rural transect. *Soil Biology and Biochemistry*, v.31, n.8, p.1091-1100, jul. 1999. Elsevier BV.

## **Apêndices**



## Apêndice A: Descrição dos perfis de solo

Perfil de solo 1

Data de descrição: 07/08/2019

Altitude: 682 m

Coordenadas: 23K 0323594 7395014

- 01** 0-3 cm, coloração variegada, úmida, composta de Vermelho (2.5YR 4/6) e Bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3); predomínio granular, muito pequenos a grandes, forte, duro, firme, ligeiramente plástico, não pegajoso, areno-argilosa; alguns blocos subangulares, pequenos, forte, duro, firme, ligeiramente plástico, não pegajoso, areno-argilosa; raízes: muitas de finas a médias; transição clara e plana;
- 02** 3-12 cm: coloração variegada, úmida, composta de Vermelho-amarelado (5YR 5/6) e Vermelho-amarelado (5YR 5/8); volume a) 10 cm de diâmetro, Bruno-avermelhado (5YR 4/4), arredondado, quantidade pouca, contraste difuso; matriz com predomínio granular, muito pequenos a grandes, forte, duro, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajoso, textura média, alguns blocos subangulares, pequenos a médios (este dominante), forte, dura, friável, entre ligeiramente plástica e plástica; ligeiramente pegajoso, textura média; raízes: comuns de muito finas a finas; transição clara e ondulada;
- 03** 12-16 cm: coloração variegada, úmida, composta de Bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3) e Vermelho (2.5YR 4/8); blocos subangular (dominante), pequenos à médios, moderado, macia, friável, entre ligeiramente plástica e plástica, ligeiramente pegajoso, textura média, algumas estruturas laminares, muito pequenas a pequenas, moderado, ligeiramente dura, friável, entre ligeiramente plástica e plástica; ligeiramente pegajoso; textura média; raízes: comuns de muito finas a médias; transição clara e ondulada;
- 04** 16-35 cm: Vermelho-amarelado (5YR 5/8); volumes a) fragmentos de rochas cinzas e esbranquiçadas, comum, pequenos (4 mm) a grandes (25 mm), proeminentes, arredondados; b) plástico verde, pouco, pequeno, proeminente, laminar; c) branco (talvez rocha), máximo 3 mm no eixo maior, friável raro, proeminente, arredondado; d) entre Bruno (7.5YR 5/4) e Bruno (7.5YR 4/4); comum 1 a 2 cm (média a grande), distinto; e) Vermelho (2.5YR 4/6), pouco, grande, arredondado, difuso; matriz subangular, fraca, pequena a grande, dura, firme; pegajosa, ligeiramente plástica (menor que o anterior, provavelmente devido à maior presença de grânulos); textura média (grânulos voltaram a aparecer); transição clara e ondulada; 26,5 a 34 cm (bolsão), Bruno-amarelado (10YR 5/6); matriz maciça, plástica, pegajosa, argilosa; raízes: poucas e muito finas; transição difusa ondulada;
- 05** 35-54 cm: Vermelho-escuro (2.5YR 3/6); volumes: a) Bruno-avermelhado (2.5YR 4/3), 1,5 de eixo maior, pouco proeminente, arredondado, b) fragmentos de rocha, pouco menor que 3 cm de eixo maior, proeminente, arredondado; matriz de predominância maciça, pegajosa, plástica, textura argilosa; presença de alguns blocos subangular pequenos à médios, moderado; friável; pegajosa e ligeiramente plástica; textura média (mais arenoso do que os blocos subangulares do horizonte anterior); raízes: poucas, finas; transição abrupta e plana;
- 06** 54-96,5 cm: Vermelho-acinzentado (7.5R 5/4), volumes: a) Cinzento-claro (5Y 6/1), 1,5 cm eixo maior; proeminente, pouco arredondado, b) fragmento de rocha, branco, pouco < 1 cm, arredondado; bolsão: 88 a 92 cm, Cinzento-avermelhado-escuro (5YR 4/2), textura média; volume dentro do bolsão i) fragmento de rocha branco, único, 4 cm no eixo maior; ii) fragmento de sacos plásticos, pouco e proeminente; matriz maciça; ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; textura média, com bastante areia grossa; raízes: muito raras e muito finas; transição clara e ondulada;
- 07** 96,5-103 cm: Bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6), volumes: a) branco (talvez rocha), 9 mm eixo maior, pouco arredondado, proeminente; b) Vermelho-amarelado (5YR 4/6), de 2 mm a 1,5 cm, poucos, distinto; matriz maciça, plástica e pegajosa, textura argilosa; raízes: raras e muito finas; transição abrupta e plana;
- 08** 103-136 cm: coloração variegada, em condição úmida composta por Bruno-escuro (7.5YR 3/2) e Vermelho (2.5YR 4/6), com volumes; a) plástico, pouco < 10 cm, proeminente, sem forma (azul e transparente); b) cerâmica com esmalte branco, pouco, proeminente, 3,5 cm de eixo maior; c) fragmento de rocha (igual aos anteriores), proeminentes, poucos, de 0,5 cm a 3 cm; d) Preto (7.5YR 2.5/1), poucos, 4 cm, proeminente, arenoso, não plástico, não pegajoso; e) coloração variegada, úmida, composta de Cinzento-brunado-claro (10YR 6/2) e Bruno-acinzentado (10YR 5/2); maciça, proeminente, 10 cm (único), poucos, irregular, argilosa, plástica, pegajosa; matriz de estrutura maciça, plástica, e ligeiramente pegajosa, argilosa, raízes: raras e muito finas; transição abrupta e plana;
- 09** 136-197 cm+: coloração variegada, em condição úmida composta de Bruno-escuro (7.5YR 3/2), Preto (7.5YR 2.5/1) e Bruno-amarelado-claro (10YR 6/4); volume: a) pedaço de tecido amarelo, tamanho 4 cm, pouco (1), proeminente e irregular, b) cerâmica com esmalte branco, 1,5 cm, raro, proeminente, irregular, c) plástico duro (tipo embalagem de sorvete), pouco, 5 cm, proeminente, d) pedaço de piso vermelho com cimento cinza, 8 cm, proeminente, irregular, raro, e) cascalho de rio arredondado, 1 a 3 cm, comuns, proeminente; matriz maciça, plástica, e pegajosa, textura argilosa;

**Observações:** Os horizontes 1 e 2 apresentaram cheiro de enxofre.

- 01** 0-5,5 cm: Bruno-escuro (7.5YR 3/3), blocos subangulares, muito grandes, moderado a forte, ligeiramente duros, friável, plástico, pegajoso, argiloso; granular de grandes a muito grandes, forte, duros, firme, plástico, pegajoso, textura média; raízes comuns de muito fina a média, transição abrupta e ondulada;
- 02** 5,5-11 cm: Bruno-escuro (2.5YR 3/6), a) concreto, pouco, 7 cm, proeminente, irregular; b) artefato não identificado (parece cerâmica) com cor Bruno (7.5YR 5/4), duro, irregular, 4,5 cm, raro; c) tijolo, irregular, 3 cm raro, distinto, proeminente, d) vidro, raro, 1 cm, difuso, irregular; matriz subangular (dominante 95%) média a muito grande, moderado, dura, friável, argilosa; algumas estruturas granulares pequenas à médias; moderado, dura, friável, argilosa, plástica e pegajosa; raízes muito fina e poucas; transição abrupta e ondulada;
- 03** 11-21 cm: Vermelho-amarelado (5YR 4/6); volumes: a) concreto, 2 a 7,5 cm, comum, sem forma definida (irregular), proeminente; b) fragmentos de rocha (brita clássica), acinzentada, 1,5 cm a 5 cm, abundante irregular, distintas; c) esbranquiçado, quebradiço, piso, 1 a 7 cm, pouco, difuso; matriz de grãos soltos, não plástico, não pegajoso, arenoso; raízes: raras e muito finas, transição abrupta e descontínua;
- 04** 21-26 cm: entre Cinzento (6/N) e Cinzento-claro (7/N); volumes: a) Preto (10YR 2/1), irregular, mancha irregular que ocupa 45% da matriz, cinza, abundante, proeminente; b) tecido, raro, alongado, >7 cm; c) tijolo baiano, 6 cm, raro, proeminente; matriz maciça; argilosa, muito plástica, muito pegajosa, raízes raras e muito finas; transição abrupta e descontínua;
- 05** 26-45 cm: Bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2); volumes: a) Bruno-amarelado (10YR 5/8), < 7 mm a 1 mm, comum, irregular, distinto; b) Preto (10YR 2/1), comum, arredondado; 1,5 cm a 0,2 cm, proeminente; c) pontos brancos (parece cimento), 2,5 cm a 0,1 cm, raros, proeminente, arredondados a irregulares; d) fragmentos de rocha, raros < 2,5 cm, irregulares, distintos; e) bolsão arenoso, Bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3), 10 cm, arredondado, com muito grânulos, proeminente; matriz maciça, plástico e pegajoso, argiloso (com pouca areia perceptível no tato); raízes raras: muito raras e muito finas; transição abrupta e ondulada;
- 06** 45-53 cm: coloração variegada, úmida, composta de Vermelho-amarelado (5YR 5/8), Vermelho-amarelado (5YR 4/6) e Amarelo-oliváceo (2.5Y 6/8); volumes: a) cinza igual ao 21-26 cm, raro, forma de linha horizontal, proeminente, 10 cm (eixo maior); b) roxo, forma de linha horizontal, 2,5 cm, raros, proeminente, matriz argilo-arenosa, com muita areia grossa, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajosa; c) fragmento de quartzo branco, raros, proeminentes, irregular, 1 a 2 cm; bolsão: redondo, 8 cm de diâmetro, distinto, Bruno-amarelado-escuro (10YR 3/4), argilo-arenosa; d) fitilho verde, raro, proeminente, linear; matriz maciça, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, textura média; raízes: muito raras e muito finas; transição clara e ondulada;
- 07** 53-59 cm: coloração variegada, úmida, composta de Bruno-forte (7.5YR 4/6) e Bruno-forte (7.5YR 5/8); e Cinzento-claro (10YR\_1/9.5/); volumes: a) cerâmica, rara, proeminente, 4,5 cm, laminar; b) madeira, irregular, raro, 3,5 cm, proeminente; c) concreto, raro, 2 a 5 cm, irregular, distinto; matriz maciça, plástica, pegajosa, argilosa; raízes: raras e muito finas; transição ondulada, gradual;
- 08** 59-72 cm: Bruno-amarelado-claro (10YR 6/4); volumes: a) tijolo baiano, 6 a 11 cm, comuns, proeminentes, irregular; b) madeira, 13 cm, raro, distinto, irregular; c) cerâmica, 1 a 6 cm, laminar; d) concreto, poucos, 9 cm, difuso, irregular; e) plástico, irregular, 20 cm, proeminente, comum, raízes raras e muito finas; f) fio de cobre (chuveiro), 28 cm, pouco, alongado, proeminente; g) fita plástica, alongado, 19 cm, proeminente, poucos; h) fitilho, raro, 11 cm, proeminente, alongado; i) revestimento de compensado, laminar, poucos, 6 cm; j) tufo de linha, 13 cm pouco, distinto, alongado; k) galho, preto, 4 cm, proeminente, raro, alongado; matriz grãos soltos, não plástica, não pegajoso, arenosa; transição abrupta e descontínua ;
- 09** 72-150 cm: Preto (10YR 2/1); volumes: a) tijolos, comuns, proeminentes, 13 a 9 cm, irregular; b) cerâmica; irregular, 6 cm; proeminente (esmalte branco), pouco; c) concreto, comum, 30 cm, proeminente; d) plástico + duro (cano); 18 cm; difuso; irregular; poucos; e) borracha, poucos, 12 cm, difuso, irregular; f) objeto antrópico laminar não identificado de tom preto; 10 cm; poucos, difuso; g) Vermelho (2.5YR 4/8), 35 cm, irregular, proeminente, poucos, argiloso, plástico e pegajoso; h) entre Vermelho-acinzentado (5R 5/2) e Vermelho-acinzentado (5R 4/2), poucos, arredondados, 2,5 cm, proeminentes; matriz maciça, plástico, ligeiramente pegajoso, argilosa; raízes raras e finas;

**Observações:** No horizonte 1 foi encontrado material hospitalar a 10 cm de profundidade, duas minhocas, um tatu bola, um ninho com larvas de formiga e sementes arredondadas;

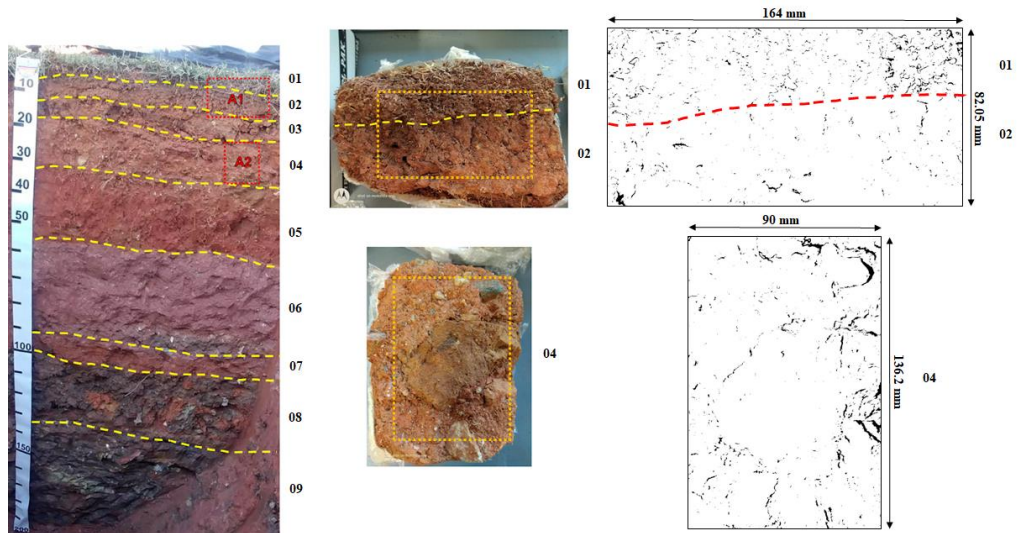
**Perfil de solo 3**  
**Altitude: 574 m**

**Data de descrição: 15/08/2019**  
**Coordenadas: 23K 0324065 7394997**

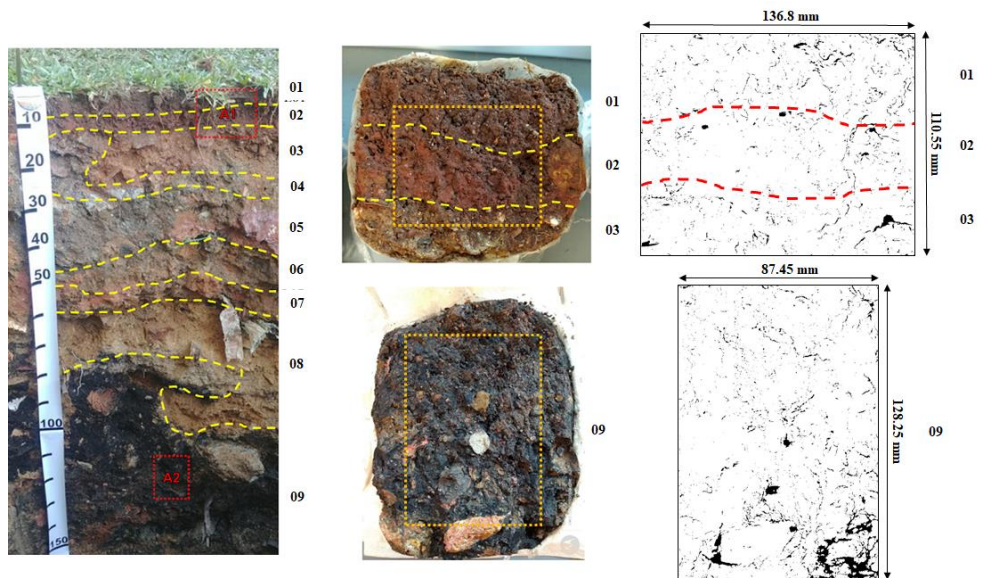
- 01** 0-9 cm: entre Vermelho-escuro-acinzentado (7.5YR 3/3) e Vermelho muito escuro-acinzentado (7.5YR 2.5/3); granular, grande a muito grande, moderada, macia, friável, muito plástico e muito pegajosa, argilosa; blocos subangulares pequenos a muito grandes, moderada, ligeiramente dura a dura, friável, muito plástico e muito pegajosa, argilosa; raízes: muito finas a finas, abundantes, canais biológicos, presença de formigas; transição difusa e plana;
- 02** 9-17 cm: Vermelho-amarelado (5YR 4/6); volumes: a) brita de 3 mm a 2 mm, forma não definida com eixo maior de 5 cm raro, b) Vermelho-escuro (2.5YR 3/6), canais preenchidos por material escuro, ninho de formiga; blocos subangulares pequenos a muito grandes, forte, dura, friável, muito plástica e muito pegajosa, argilosa; raízes: muito finas e comuns; transição difusa ondulada;
- 03** 17-36,5 cm: Vermelho (2.5YR 4/6); volumes: a) brita de 9 a 0,5 cm no eixo maior, abundante, forma não definida, proeminente; b) possível grande canal preenchido com material escuro cortando na vertical todo o horizonte, cor Bruno-escuro (7.5YR 3/2); c) material esbranquiçado com 1 cm de eixo maior, raro, proeminente, coloração variegada, úmida, composta de Preto (2.5Y 2.5/1) e Amarelo (2.5Y 8/6); matriz de estrutura blocos subangulares pequena a muito grande, forte, duro, friável, muito plástica e muito pegajosa, argilosa; raízes: muito fina e comuns; transição clara e ondulada;
- 04** 36,5-45 cm: Bruno-avermelhado-escuro (5YR 2.5/2); blocos subangulares, muito pequenos a pequenos, forte, macia, muito friável; argiloso, muito plástica e muito pegajosa; algumas áreas com material maciço de textura argilosa na matriz; raízes: finas e raras; transição clara e ondulada;
- 05** 45-54 cm: coloração variegada, úmida, composta de Bruno-escuro (7.5YR 3/4) e Vermelho (2.5YR 5/6); matriz com blocos subangulares, médios a grandes, moderado, ligeiramente dura, firme, muito plástico e muito pegajosa, argilosa; granulares médias, forte, macia, muito friável; muito plástica e muito pegajosa, argilosa; transição clara e plana;
- 06** 54-56 cm: Preto-avermelhado (2.5Y 2.5/1); volumes: a) seixo rolado; comum; difuso, 3-1,5 cm; arredondados; b) brita, raro; distinta; 1,5-2 cm; c) material argiloso, raro, não possui forma definida; proeminente; 9 cm, Rosado (2.5Y 8/4), muito plástico, muito pegajoso; blocos subangulares, muito pequenos a pequenos, forte, macia, muito friável; argiloso, muito plástica e muito pegajosa; raízes: poucas e finas, canais biológicos; transição clara e plana;
- 07** 56-65 cm: Vermelho-amarelado (5YR 4/6); volume: a) fragmento de rocha intemperizado, comuns; 1,5 cm a 6 cm, proeminentes; b) fragmento rochoso, possivelmente seixo de rio, raro, 1 cm, proeminente; c) material escuro, raros, possivelmente fragmento rocha; d) tijolo, raro, 3 cm, proeminente; matriz maciça, forte, muito plástica, muito pegajosa, textura média; raízes e finas; raízes muito finas e raras, transição clara e plana ; presença de canais;
- 08** 65-80 cm: Bruno-escuro (7.5YR 3/2); volumes: a) fragmento de rocha, seixo rolado, 2-3 cm, comum, proeminente; b) brita, 1,5-12 cm, comum, difuso; c) volume alaranjado, 4 cm, raro, proeminente; Vermelho (2.5YR 4/8); d) fragmento de rocha intemperizado, 10 cm, proeminente, esbranquiçado; e) plástico, raro, esbranquiçado, 3 cm, proeminente, laminar; matriz maciça, muito plástica e muito pegajosa, argilosa; raízes: raras e finas; presença de canais biológicos; transição difusa e ondulada;
- 09** 80-88 cm: coloração variegada, úmida, composta de Oliváceo-claro (10Y 5/4), Preto-avermelhado (2.5YR 2.5/1) e Bruno-avermelhado (2.5YR 5/4); volumes: a) fragmento de rocha, raro, 5 cm, proeminente, sem forma definida; b) Cinzento-avermelhado (2.5YR 5/1), comum, difuso, 1-8 cm; c) coloração variegada, úmida, composta de Amarelo (10YR 8/6) e Vermelho (7.5R 4/8), raro, 5-2 cm; proeminente, sem forma definida, extremamente duro, muito firme, muito plástico, muito pegajoso; d) preto, sem forma definida, proeminente, 2-0,5 cm; e) granito rosa, raro, proeminente, 3 cm; matriz maciça, muito plástica e muito pegajosa, argilosa; raízes: raras e finas; transição difusa e plana;
- 10** 88-156<sup>+</sup> cm: Verde-acinzentado (5GY 5/2); volumes: a) fragmento de rocha esbranquiçada, proeminente, raro, 1-1,5 cm; matriz de blocos subangulares, grandes, moderado, extremamente duro, extremamente firme, muito plástico, muito pegajoso, argilosa; raízes: muito finas e raras;

## Apêndice B: Localização das amostras escaneadas nos perfis de solo

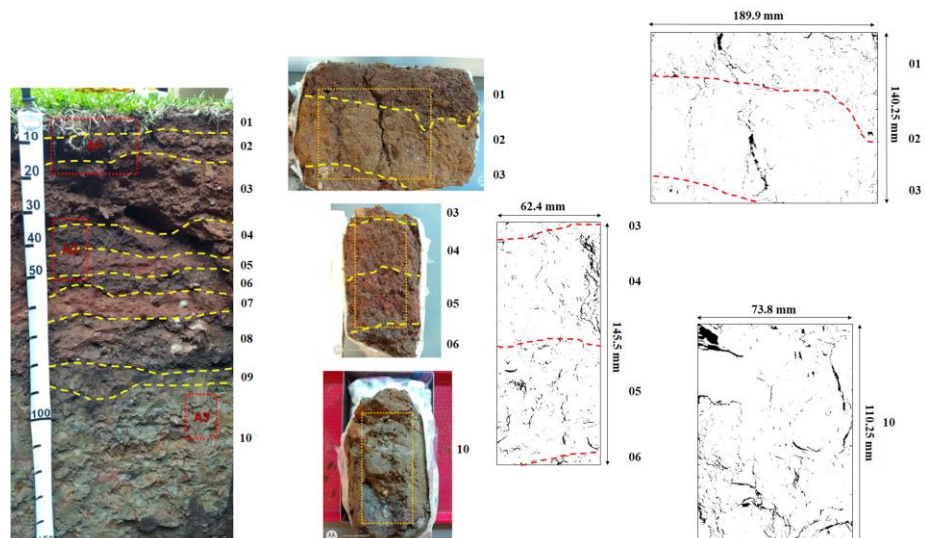
### Perfil 1



### Perfil 2



### Perfil 3

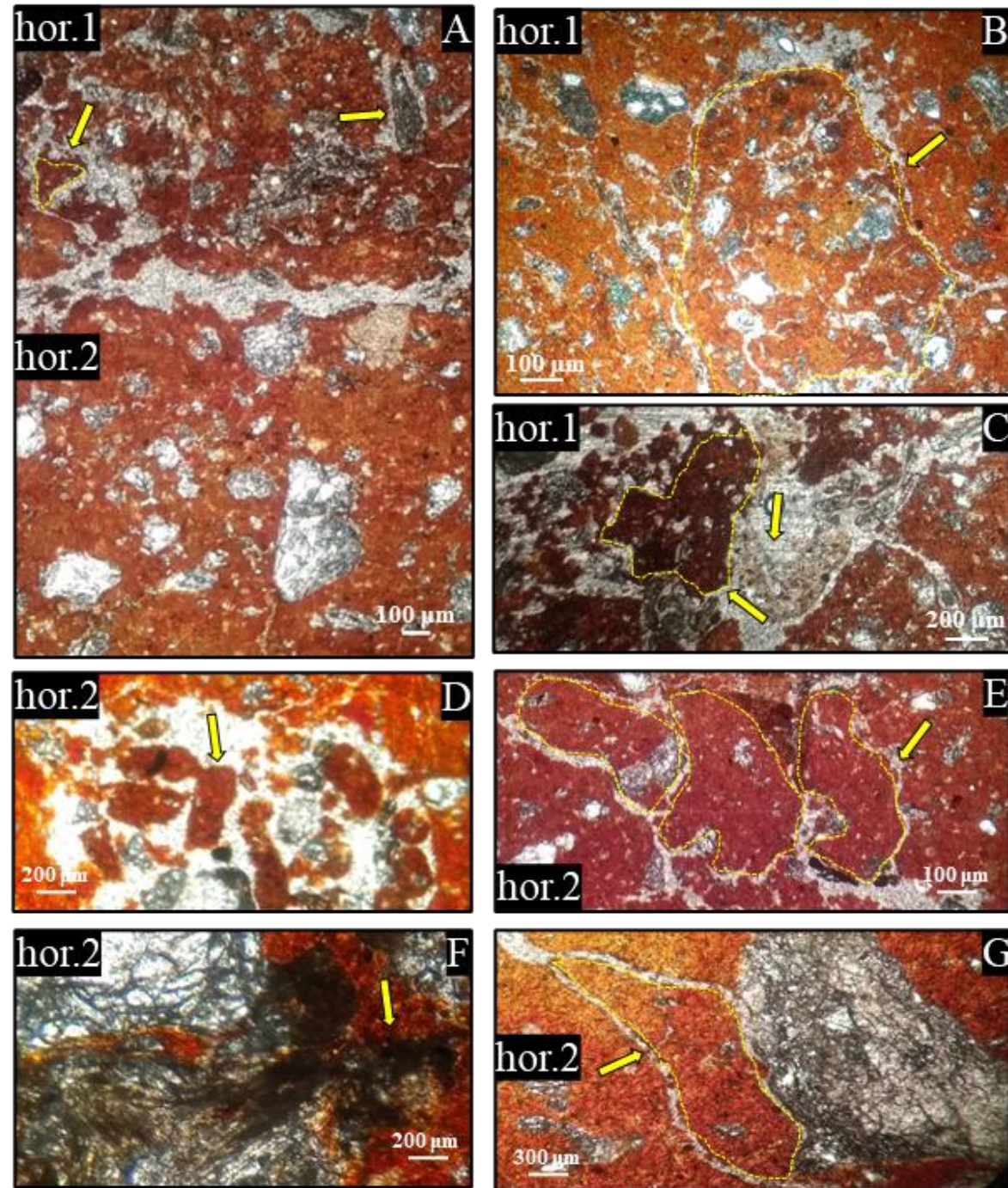




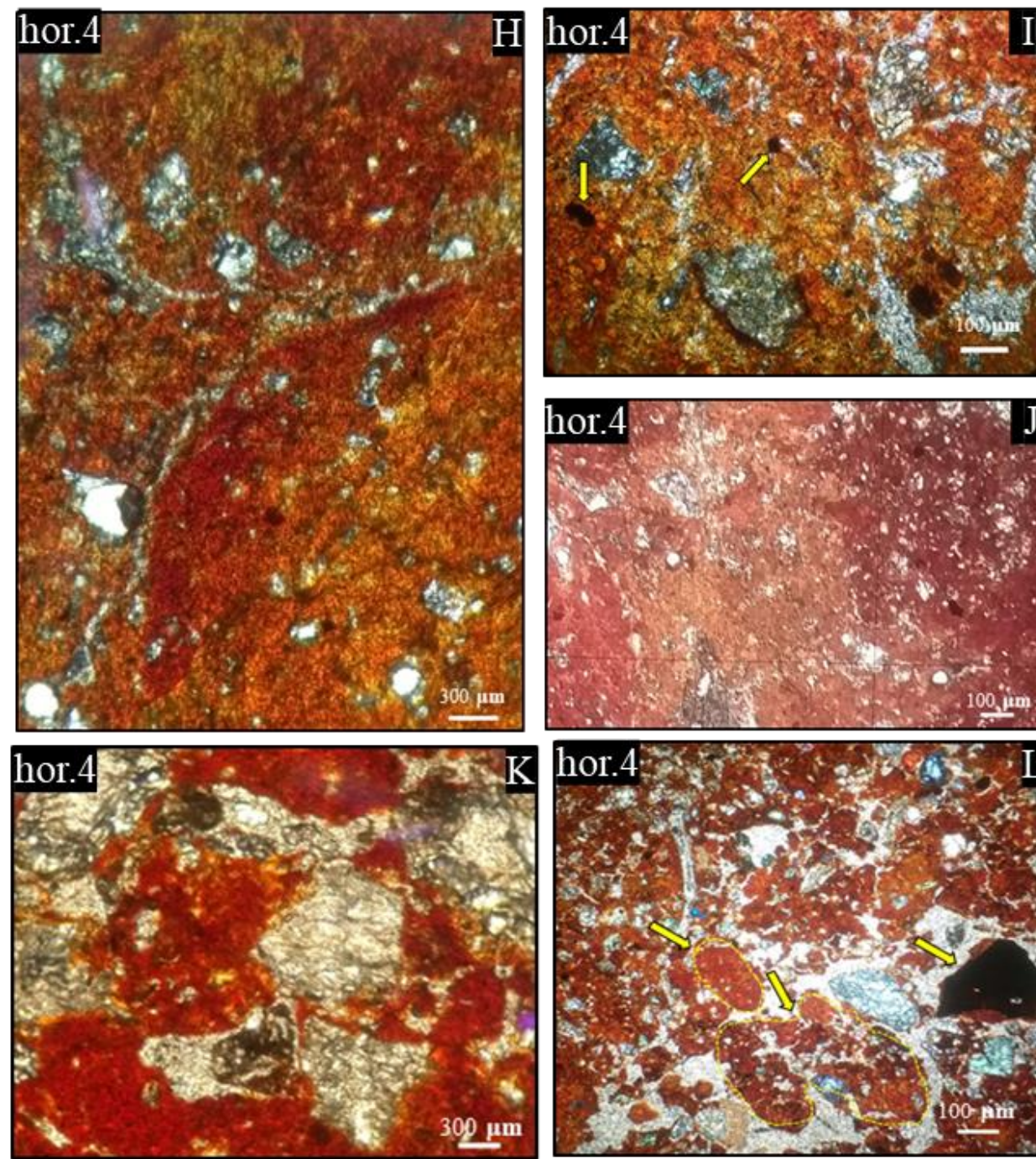
## Apêndice C: Descrição micromorfológica

### Perfil 1

#### Lâmina da área de transição entre os horizontes 1 e 2 do perfil 1



#### Lâmina do horizonte 4 do perfil 1

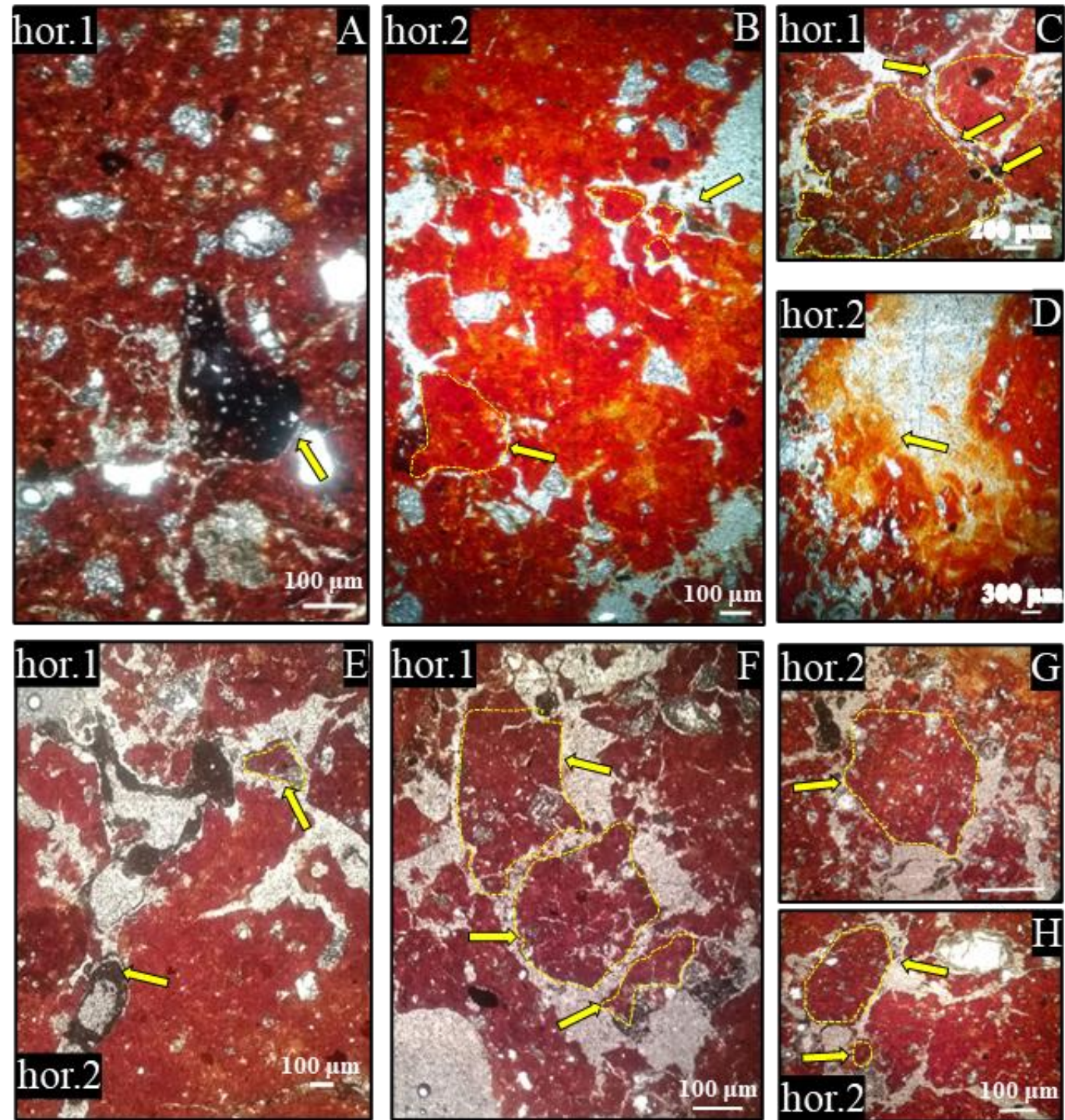


A: horizontes 1 e 2 com presença e fração grossa com quartz subangulares. No horizonte 1 a flecha à esquerda indica a presença de blocos e a flecha à direita a presença de raízes; B: bloco fraturado no horizonte 1; C: bloco no horizonte 1 e artefato antrópico de composição não definida; D: excrementos no horizonte 2; E: blocos, com presença de quartzo, no horizonte 2; F: raiz em decomposição no horizonte 2; G: blocos no horizonte 2; H: matriz maciça do horizonte 4; I: nódulos no horizonte 4; J: quartzo subangular no horizonte 4; K: ausência de *peds* no horizonte 4; L: excremento e nódulo opaco no horizonte 4.

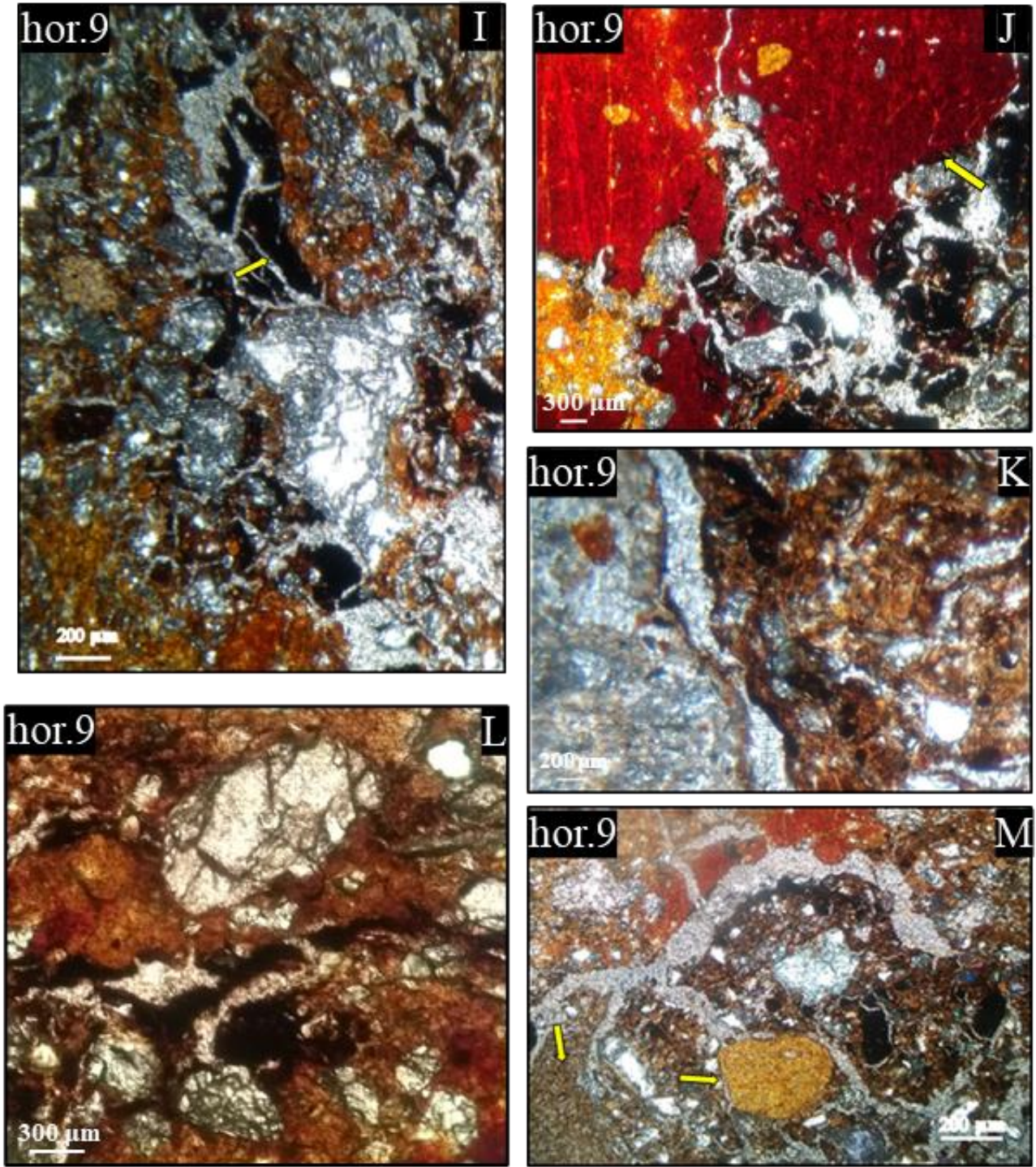


Perfil 2

Lâmina da área de transição entre os horizontes 1 e 2 do perfil 2



Lâmina do horizonte 9 do perfil 2

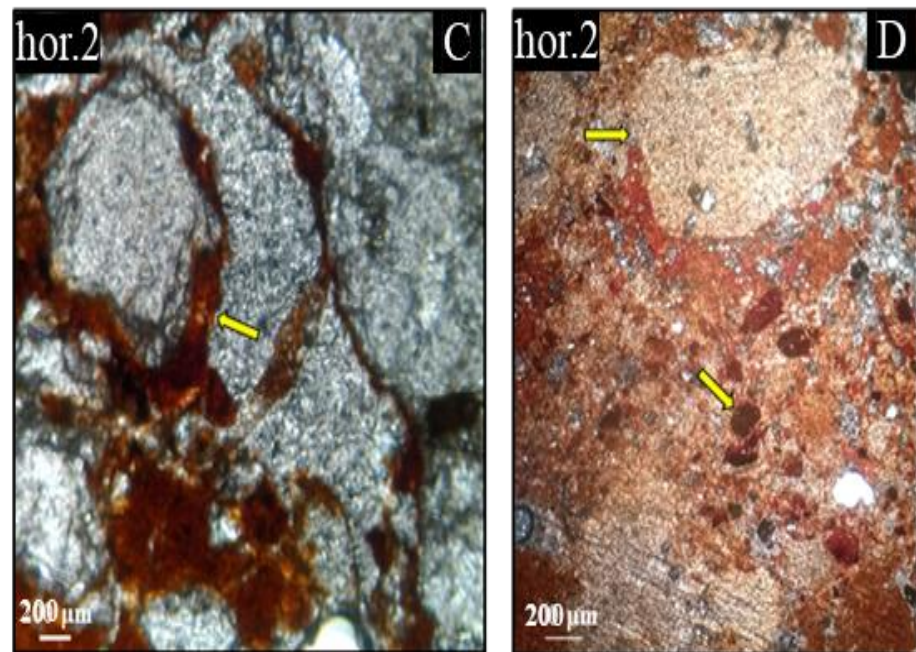
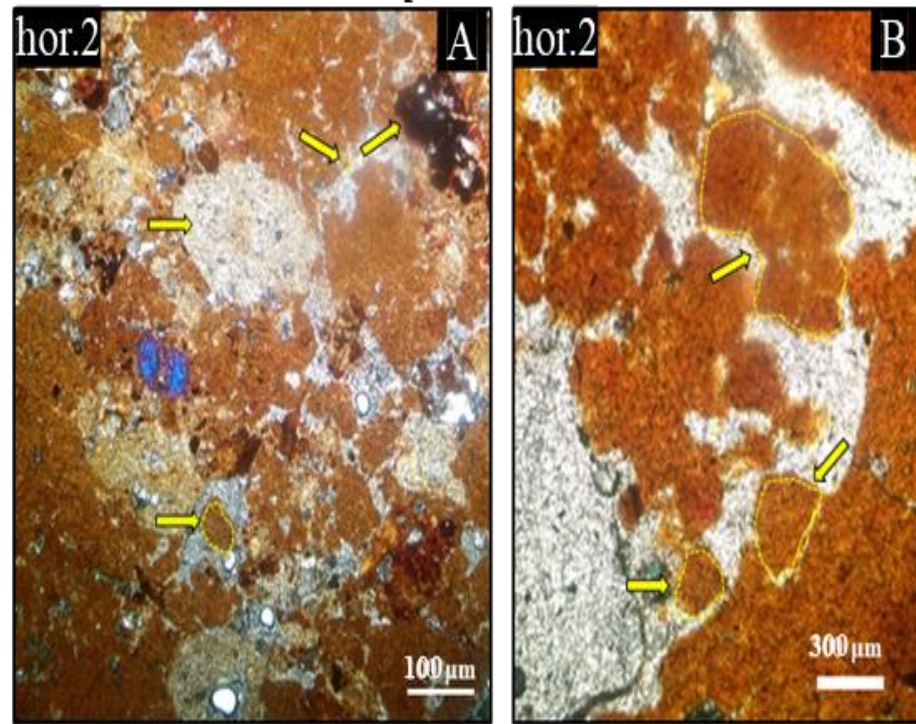


A: quartz subangulares em matriz fina e presença de nódulo opaco salpicado no horizonte 1; B: horizonte 2 com blocos; C: horizonte 1 com *peds* blocos e transição de grumo/blocos, e presença de nódulos opacos; D: material fino, rico em óxido de ferro, atuando no processo de fragmentação pelo processo de plasma infusion; E: material orgânico em poro que atravessa o horizonte 1 em direção ao horizonte 2, e presença de blocos no horizonte 1; F: blocos e transição grumo/bloco no horizonte 1; G: bloco no horizonte 2; H: grumos no horizonte 2; I: material escuro, possivelmente orgânico, no horizonte 9; J: argila no horizonte 9; K: material de coloração castanha possivelmente rico em material orgânico; L: quartzo com material escuro em suas fraturas; M: presença de artefatos antrópicos de composição não identificada.

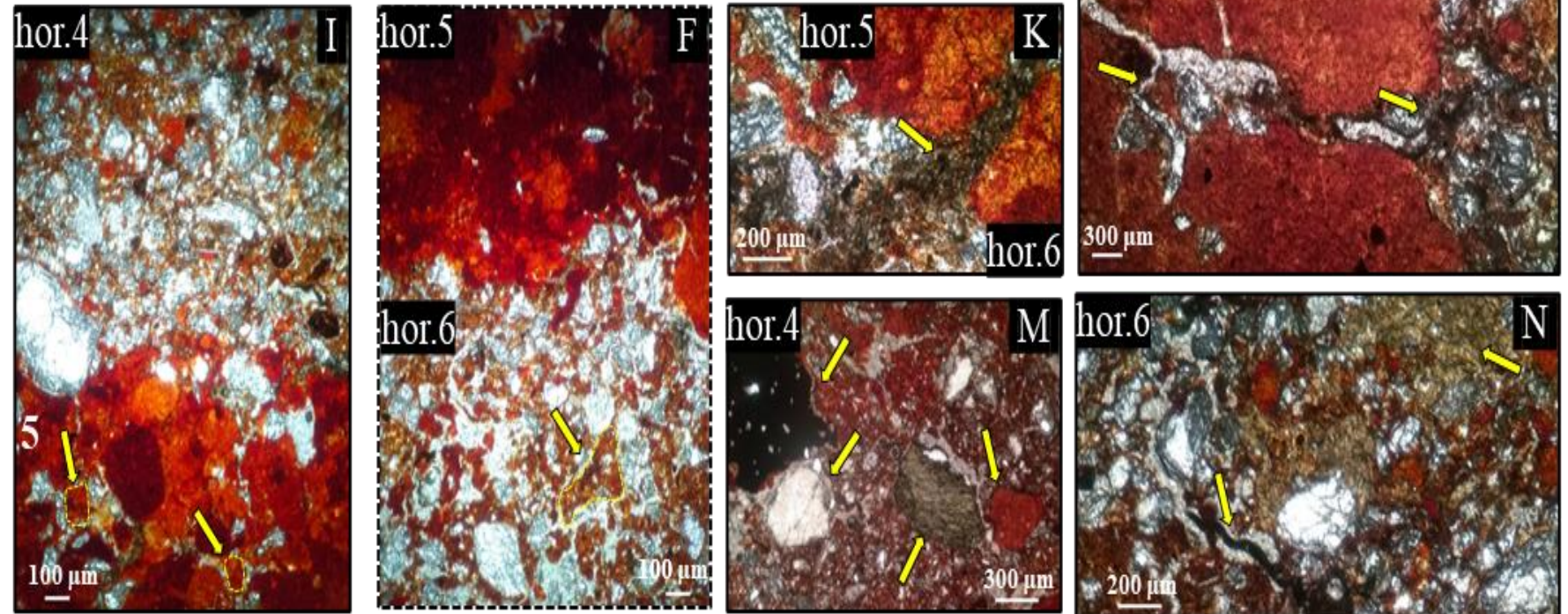
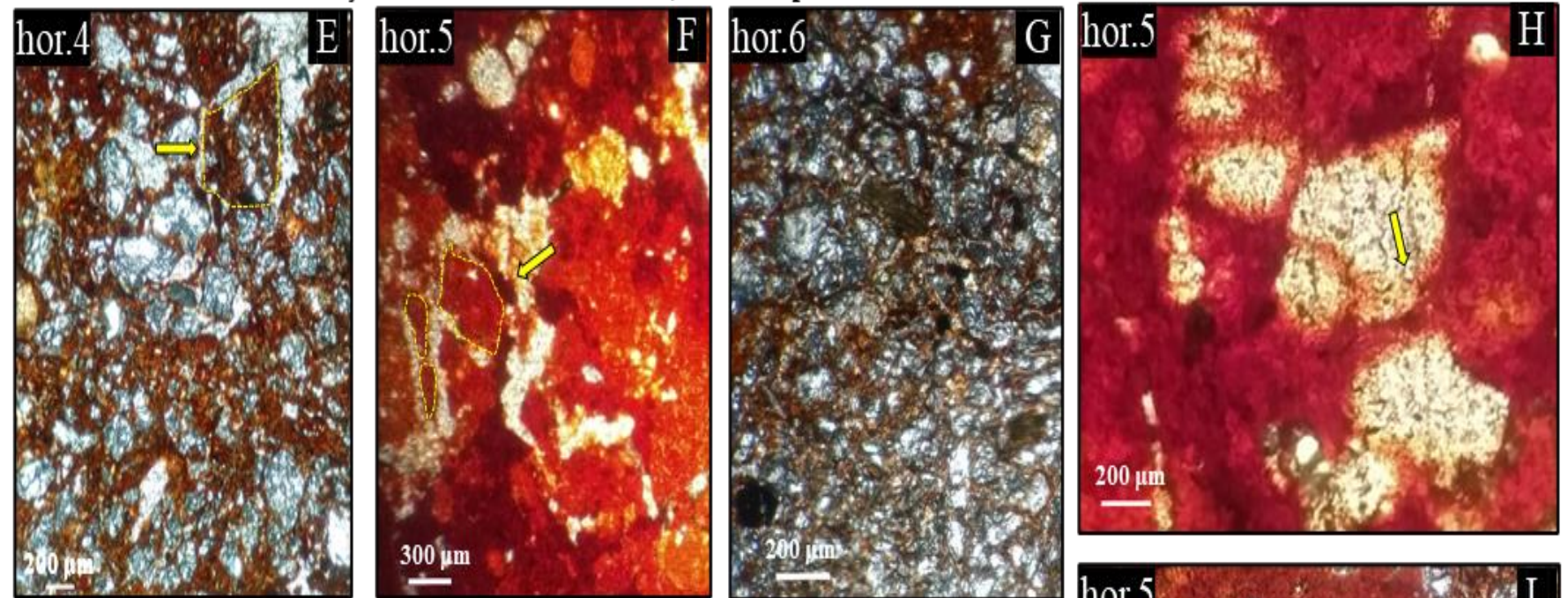


Perfil 3

Lâmina do horizonte 2 do perfil 3



Lâmina da área de transição entre os horizontes 4, 5 e 6 do perfil 3



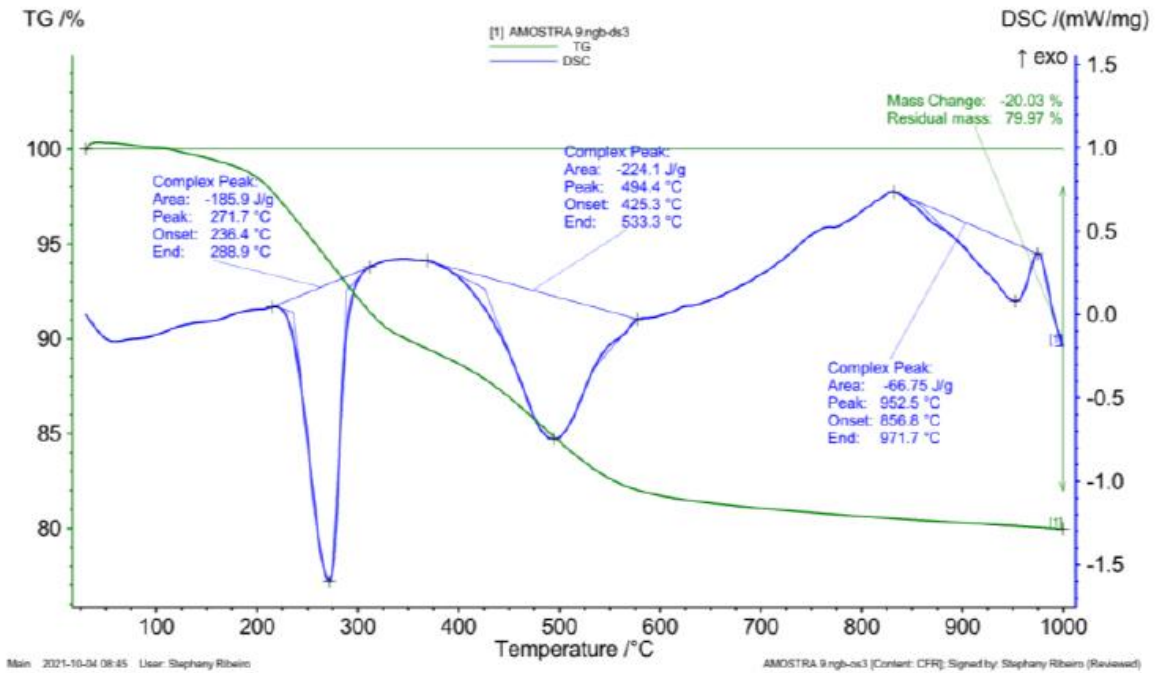
A: artefatos antrópicos de composição indefinida, nódulos opacos, e presença de blocos, no horizonte 2; B: blocos no horizonte 2; C: quartzo com revestimento de material fino no horizonte 2; D: artefatos antrópicos de composição não definida no horizonte 2; E: quartzo revestido de material fino no horizonte 4; F: blocos no horizonte 5; G: predomínio de fração grossa no horizonte 6; H: *plasma infusion* no horizonte 5; I: transição entre os horizontes 4 e 5; J: transição entre os horizontes 5 e 6; K: material orgânico migrando do horizonte 5 para o horizonte 6; L: material orgânico revestindo canal; M: nódulos e, quartzos no horizonte 4; N: artefato antrópico de composição indefinida e material antrópico em forma de filamento.



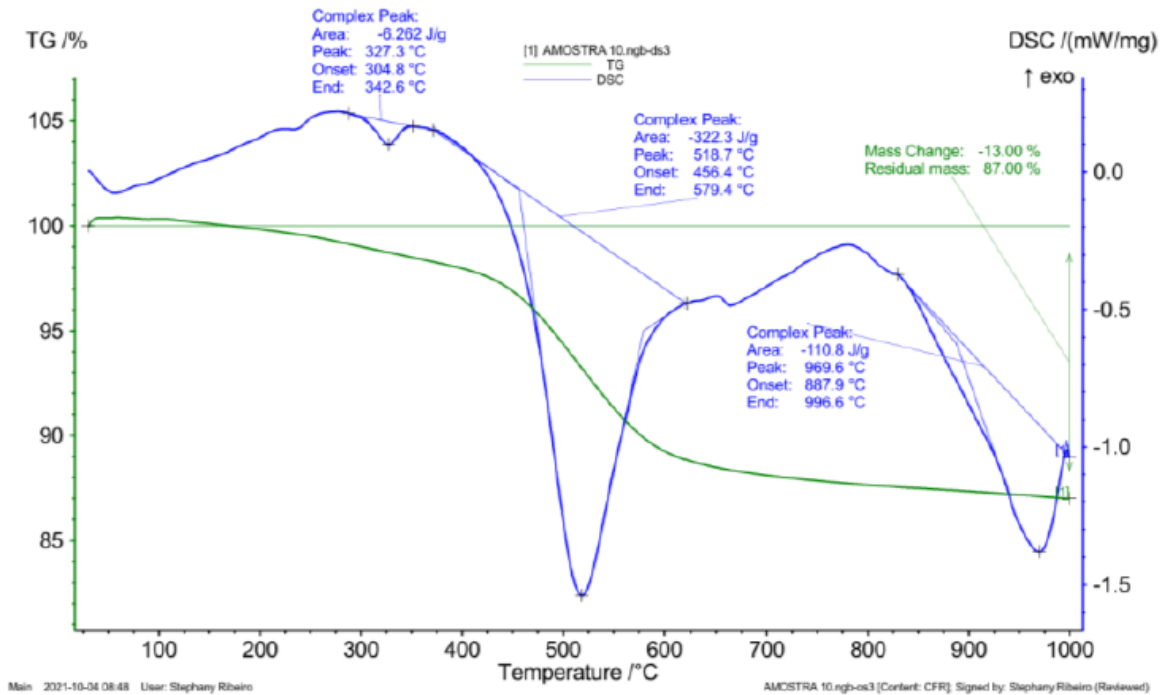
## **Anexos**



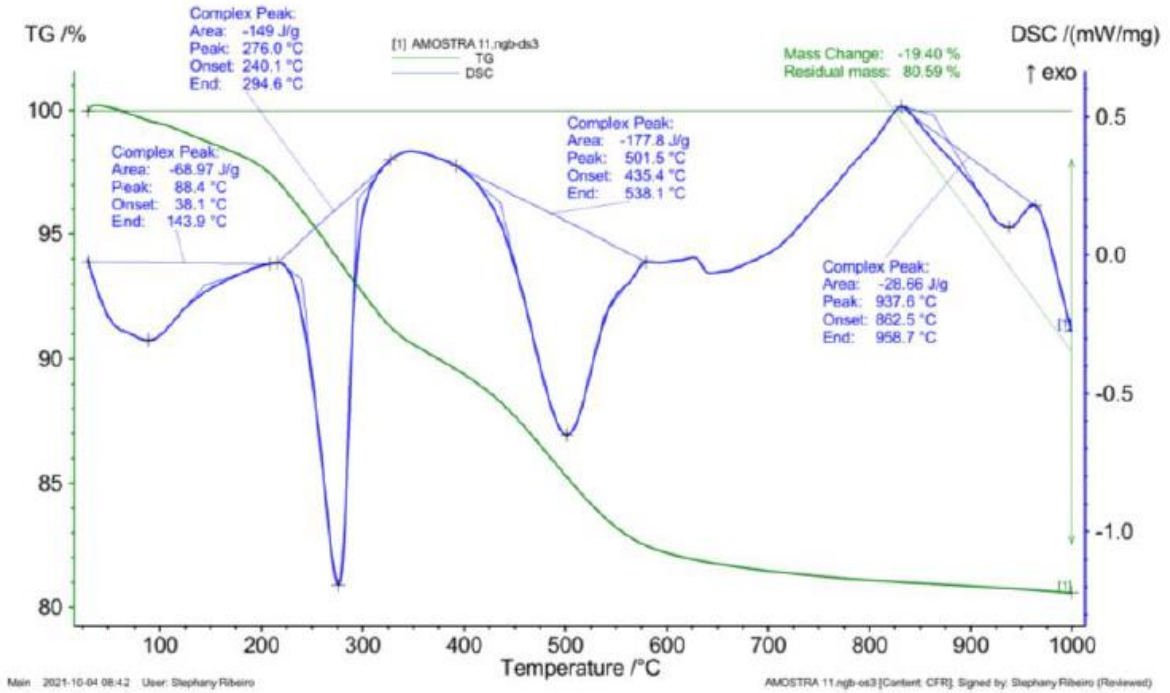
**Anexo A: Termograma das amostras de argila**  
**Amostra do perfil 1 horizonte 3**



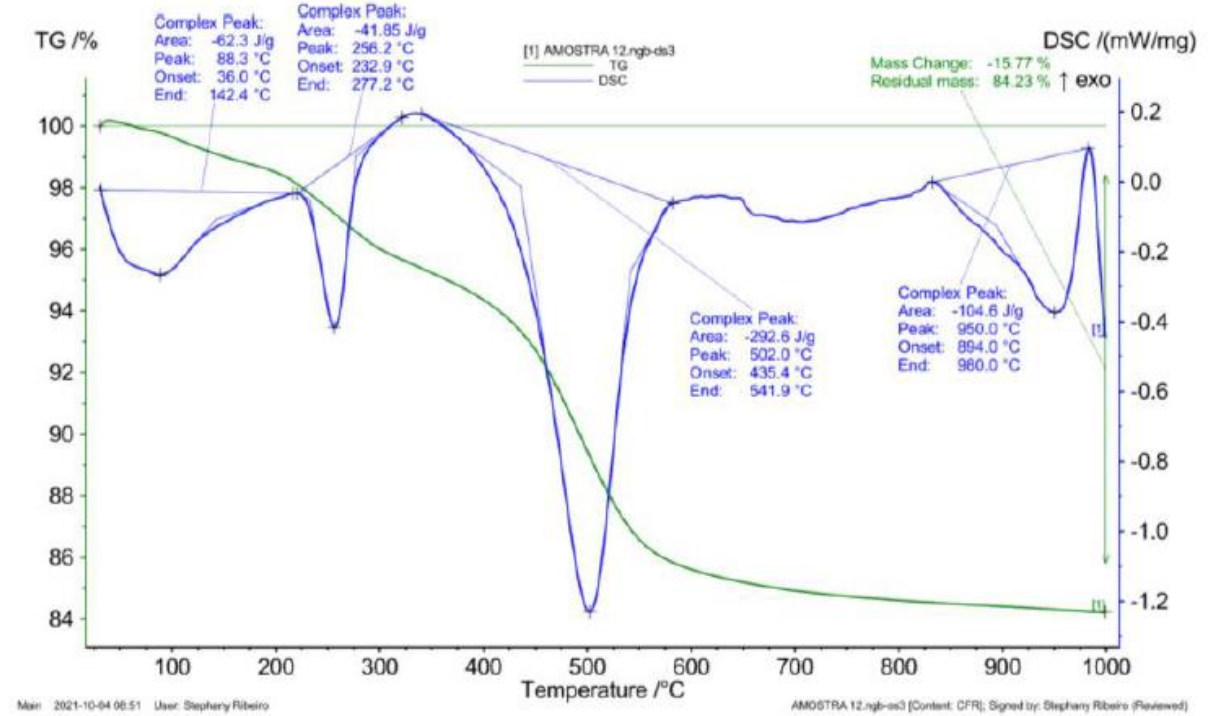
**Amostra do perfil 1 horizonte 6**



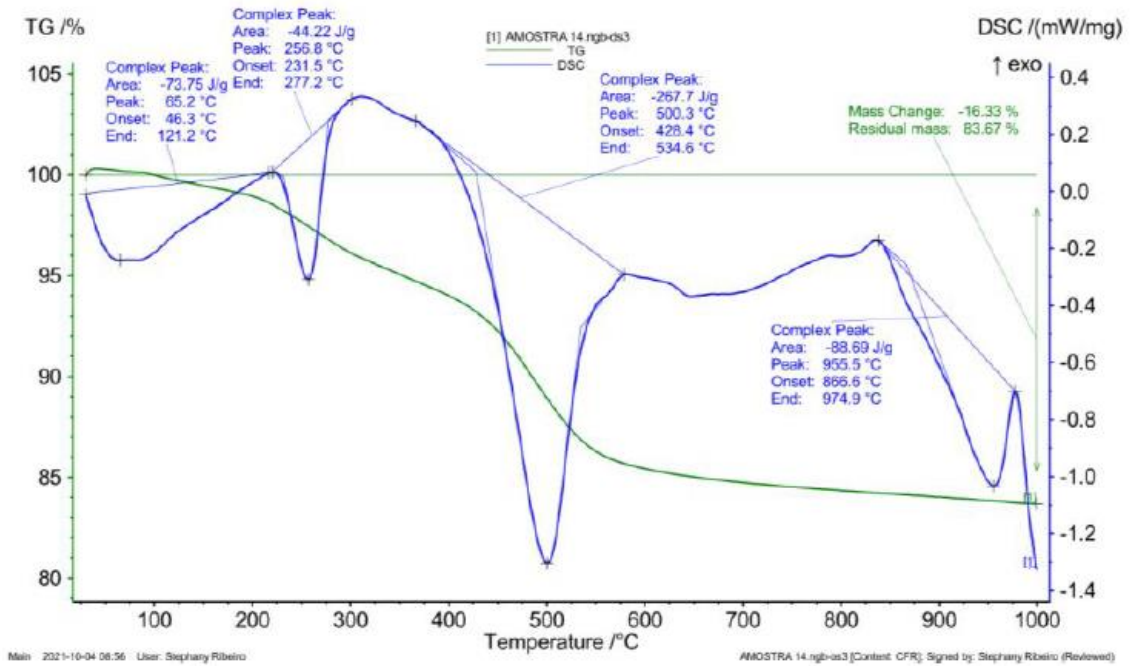
### Amostra do perfil 1 horizonte 9



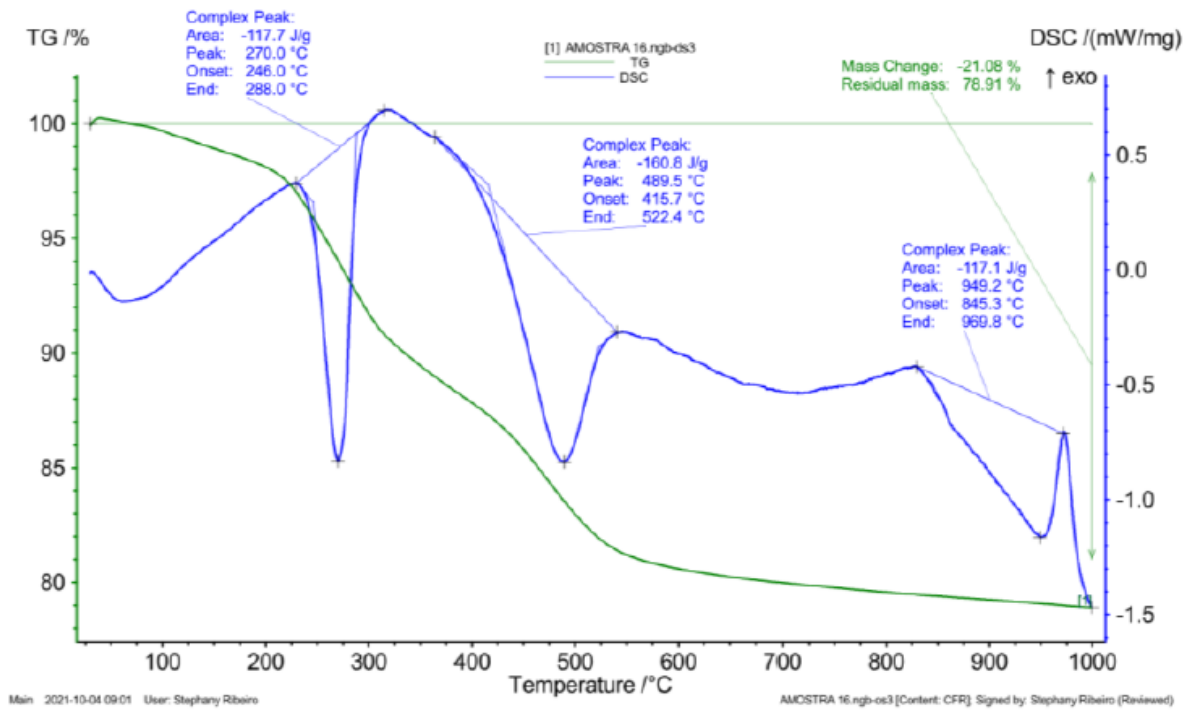
### Amostra do perfil 2 horizonte 7



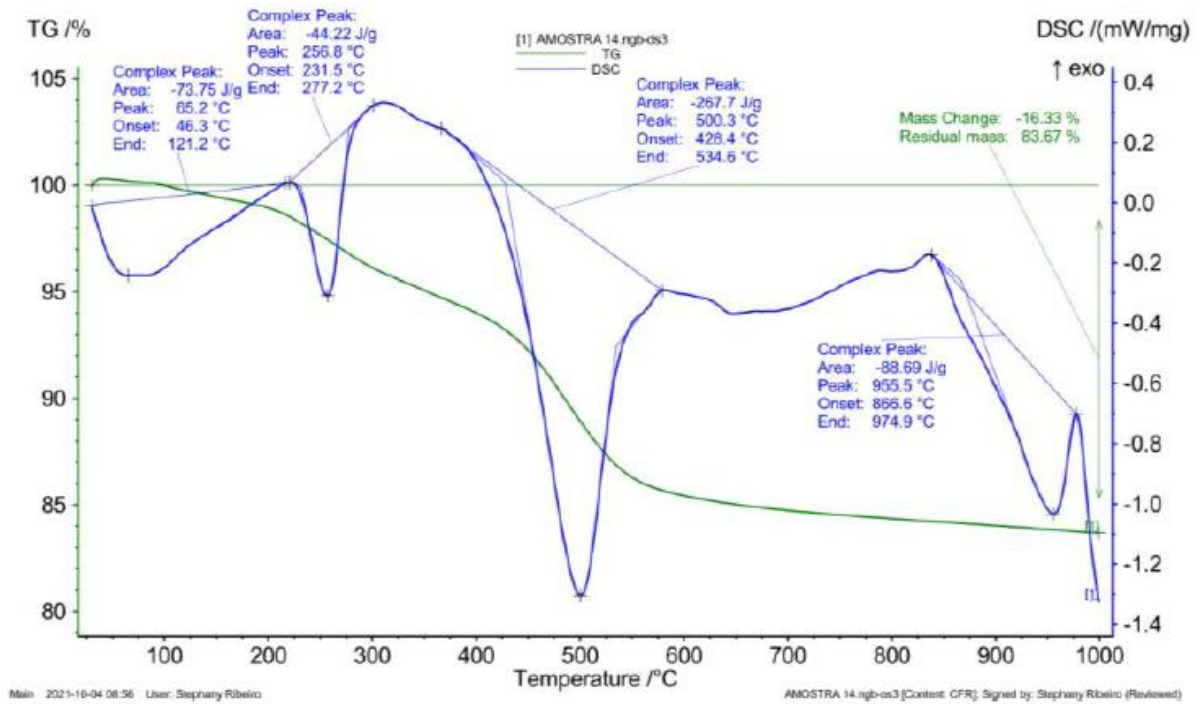
### Amostra do perfil 2 horizonte 9



### Amostra do perfil 3 horizonte 1



### Amostra do perfil 3 horizonte 4



### Amostra do perfil 3 horizonte 9

