

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ- UNIOESTE
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, EDUCAÇÃO E LETRAS
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

CAROLINA GLAESER BENINCÁ

**AÇÃO DE FORMIGAS DO GÊNERO *Atta* (*Hymenoptera: Formicidae*) NA
COMPOSIÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E PRESERVAÇÃO DA ASSEMBLEIA DE
FITÓLITOS DE UM LATOSSOLO: UM ESTUDO EM MICRO E MACRO
ESCALA**

Área de Concentração: Espaço de Fronteira: Território e Meio Ambiente

Linha de Pesquisa: Dinâmica e Gestão Ambiental em Zona Subtropical

Orientadora: Prof^a. Dra. Marcia Regina Calegari

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PR

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ- UNIOESTE
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, EDUCAÇÃO E LETRAS
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

CAROLINA GLAESER BENINCÁ

**AÇÃO DE FORMIGAS DO GÊNERO *Atta* (Hymenoptera: Formicidae) NA
COMPOSIÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E PRESERVAÇÃO DA ASSEMBLEIA DE
FITÓLITOS DE UM LATOSSOLO: UM ESTUDO EM MICRO E MACRO
ESCALA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* de Marechal Cândido Rondon, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientadora: Dra. Marcia Regina Calegari

**MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PR
2024**

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Glaeser Benincá, Carolina
AÇÃO DE FORMIGAS DO GÊNERO Atta (Hymenoptera: Formicidae)
NA COMPOSIÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E PRESERVAÇÃO DA ASSEMBLEIA DE
FITÓLITOS DE UM LATOSSOLO: UM ESTUDO EM MICRO E MACRO ESCALA
/ Carolina Glaeser Benincá; orientadora Marcia Regina
Calegari. -- Marechal Cândido Rondon, 2024.
132 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Marechal
Cândido Rondon) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
Centro de Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em
Geografia, 2024.

1. Fitólitos. 2. Bioturbação. 3. Tafonomia. 4. Latossolo.
I. Calegari, Marcia Regina, orient. II. Título.



Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



Programa de Pós-Graduação em Geografia

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CAROLINA GLAESER BENINCÁ, ALUNO(A) DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE, E DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO DO PROGRAMA E O REGIMENTO GERAL DA UNIOESTE.

Ao(s) 27 dia(s) do mês de junho de 2024 às 8h00min, na modalidade remota síncrona, por meio de chamada de videoconferência, realizou-se a sessão pública da Defesa de Dissertação do(a) candidato(a) Carolina Glaeser Benincá, aluno(a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia - nível de Mestrado, na área de concentração em Espaço de Fronteira: Território e Ambiente. A comissão examinadora da Defesa Pública foi aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia. Integraram a referida Comissão os(as) Professores(as) Doutores(as): Vanda Pietrowski, Margarita Luisa Osterrieth, Marco Madella, Marcia Regina Calegari. Os trabalhos foram presididos pelo(a) Marcia Regina Calegari, orientador(a) do(a) candidato(a). Tendo satisfeito todos os requisitos exigidos pela legislação em vigor, o(a) aluno(a) foi admitido(a) à Defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, intitulada: "Efeito de formigas do gênero Atta (Hymenoptera: Formicidae) na composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos de um Latossolo: um estudo em micro e macro escala". O(a) Senhor(a) Presidente declarou abertos os trabalhos, e em seguida, convidou o(a) candidato(a) a discorrer, em linhas gerais, sobre o conteúdo da Dissertação. Feita a explanação, o(a) candidato(a) foi arguido(a) sucessivamente, pelos(as) professores(as) doutores(as): Vanda Pietrowski, Margarita Luisa Osterrieth, Marco Madella. Findas as arguições, o(a) Senhor(a) Presidente suspendeu os trabalhos da sessão pública, a fim de que, em sessão secreta, a Comissão expressasse o seu julgamento sobre a Dissertação. Efetuado o julgamento, o(a) candidato(a) foi **aprovado(a)**. A seguir, o(a) Senhor(a) Presidente reabriu os trabalhos da sessão pública e deu conhecimento do resultado. E, para constar, o(a) Coordenador(a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE - Campus de Marechal Cândido Rondon, lavra a presente ata, e assina juntamente com os membros da Comissão Examinadora e o(a) candidato(a).

Orientador(a) - Marcia Regina Calegari
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon
(UNIOESTE)

Vanda Pietrowski
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon
(UNIOESTE)



Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



Programa de Pós-Graduação em Geografia

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CAROLINA GLAESER BENINCÁ, ALUNO(A) DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE, E DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO DO PROGRAMA E O REGIMENTO GERAL DA UNIOESTE.

Margarita Luisa Osterrieth
Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP)

Marco Madella
Universitat Pompeu Fabra (UPF)

Carolina Glaeser Benincá
Aluno(a)

Coordenador(a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**DECLARAÇÃO DE APRESENTAÇÃO DE DEFESA PARA BANCA EXAMINADORA DE DEFESA
DE DISSERTAÇÃO REALIZADA À DISTÂNCIA, DE FORMA SÍNCRONA, POR
VIDEOCONFERÊNCIA**

Eu, discente **Carolina Glaeser Benincá**, declaro, que realizei a minha defesa de mestrado à distância, de forma síncrona e por videoconferência do trabalho de dissertação intitulado em “Efeito de formigas do gênero *Atta* (Hymenoptera: Formicidae) na composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos de um Latossolo: um estudo em micro e macro escala” para banca examinadora realizada na data de 27/06/2024.

Atenciosamente,

Carolina Glaeser Benincá

CAROLINA GLAESER BENINCÁ

UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA

Modelo 3 – Para discente de Programa de Pós-graduação da UNIOESTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DECLARAÇÃO E PARECER DE PARTICIPAÇÃO EM BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE MESTRADO REALIZADA À DISTÂNCIA, DE FORMA SÍNCRONA, POR VIDEOCONFERÊNCIA

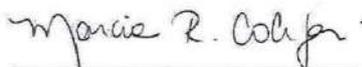
Eu, **Profª Drª Márcia Regina Calegari**, declaro, como **ORIENTADORA**, que presidi os trabalhos de defesa à distância, de forma síncrona e por videoconferência da banca de defesa da dissertação da candidata **CAROLINA GLAESER BENINCÁ**, deste Programa de Pós-Graduação.

Considerando o trabalho entregue, a apresentação e a arguição dos membros da banca examinadora, **formalizo como orientadora**, para fins de registro, por meio desta declaração, a decisão da banca examinadora de que a candidata foi considerada: **APROVADA**, na banca realizada na data de 27/06/2024, com o trabalho intitulado **“Efeito de formigas do gênero Atta (Hymenoptera: Formicidae) na composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos de um Latossolo: um estudo em micro e macro escala”**.

Descreva abaixo observações e/ou restrições (se julgar necessárias):

Aprovada sem considerações.

Atenciosamente,



Profª Drª MÁRCIA REGINA CALEGARI
UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Geografia



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



PARANÁ
GOVERNO DO ESTADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DECLARAÇÃO E PARECER DE PARTICIPAÇÃO EM BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE MESTRADO REALIZADA À DISTÂNCIA, DE FORMA SÍNCRONA, POR VIDEOCONFERÊNCIA

Eu, Prof^ª Dr^ª Vanda Pietrowski, declaro que **participei à distância, de forma síncrona e por videoconferência**, da Banca Examinadora de Defesa de Dissertação da candidata **Carolina Glaeser Benincá**, aluna de Mestrado deste Programa de Pós-Graduação.

Considerando o trabalho entregue, apresentado e a arguição realizada, **formalizo como membro**, para fins de registro, por meio desta declaração, minha decisão de que a candidata pode ser considerada APROVADA na banca realizada em 27/06/2024, com o trabalho intitulado **“Efeito de formigas do Gênero *Atta* (Hymenoptera: Formicidae) na composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos de um Latossolo: um estudo em micro e macro escala”**.

Descreva abaixo observações e/ou restrições (se julgar necessárias):

Prof^ª Dr^ª VANDA PIETROWSKI
UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Geografia



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



PARANÁ
GOVERNO DO ESTADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DECLARAÇÃO E PARECER DE PARTICIPAÇÃO EM BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE MESTRADO REALIZADA À DISTÂNCIA, DE FORMA SÍNCRONA, POR VIDEOCONFERÊNCIA

Eu, Prof^a Dr^a Margarita Luisa Osterrieth, declaro que **participei à distância, de forma síncrona e por videoconferência**, da Banca Examinadora de Defesa de Dissertação da candidata **Carolina Glaeser Benincá**, aluna de Mestrado deste Programa de Pós-Graduação.

Considerando o trabalho entregue, apresentado e a arguição realizada, **formalizo como membro externo**, para fins de registro, por meio desta declaração, minha decisão de que a candidata pode ser considerada APROVADA na banca realizada em 27/06/2024, com o trabalho intitulado **“Efeito de formigas do gênero *Atta* (Hymenoptera: Formicidae) na composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos de um Latossolo: um estudo em micro e macro escala”**.

Descreva abaixo observações e/ou restrições (se julgar necessárias):

El trabajo de tesis de Maestría presentado es original e interesante, ubicándose en un área de vacancia para la ciencia en general y Brasil en particular. La fundamentación teórica de la tesis es adecuada y suficiente, basada en la consulta bibliográfica disponible. La incorporación de los conceptos vinculados a los procesos tafonómicos que afectan los registros fitolíticos es de importancia ya que es un aspecto esencial, para las interpretaciones ambientales, pedológicas paleoambientales, paleoecológicas, pedoarqueológicas, entre otras.

La metodología aplicada es detallada y actualizada, se ha considerado la problemática de multiplicidad y redundancia, dado que es sabido afectan las interpretaciones de las asociaciones de silicofitolitos generadas y su utilidad para la definición de las posibles asociaciones que resultan en definir comunidades florísticas y/o agroecosistemas hipotetizados. Las técnicas para extracción y concentración de silicofitolitos en las muestras obtenidas, fundada en bibliografía fue la adecuada; así como la evaluación de la representatividad cuantitativa y cualitativa de los silicofitolitos respecto de la mineralogía total de la fracción esquelética de los niveles pedológicos naturales y tafonomizados. El análisis estadístico de las muestras estudiadas es amplio y suficiente.

Es de destacar la relevancia de los resultados y conclusiones obtenidos en base a la interacción de los registros fitolíticos realizados utilizando los descriptores propuestos por el ICPNWG 2.0 (2019), obtenidos, a lo extenso de los horizontes pedológicos de los perfiles seleccionados con diferentes grado de bioturbaciones y la relación con las características pedológicas morfológicas, física y químicas definidas. Así como el particular énfasis en las características tafonómicas de los distintos morfotipos de fitolitos hallados y su relación con los procesos pedológicos básicos (particularmente, adiciones, transformaciones, transferencias y pérdidas), dada la complejidad de los suelos de amplia extensión en Brasil (Latosoles), en este caso afectados por las bioturbaciones de hormigas cortadoras de hojas. Los resultados de los procesos tafonómicos de los registros silicofitolíticos hallados, aportarán



Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



sustancialmente a los resultados ya obtenidos, así como contribuir a nuevas interpretaciones de los mismos. Es interesante las determinaciones de edades absolutas mediante dataciones de los suelos, así como las relaciones que han condicionado la instalación de comunidades de gramíneas de rutas metabólicas C4, C4, y comunidades arbóreas y los posibles cambios climáticos regionales, para lo cual se sugiere evaluar en trabajos futuros también los aspectos geopedológicos locales y distintos tipos de uso del suelo en la zona. La redacción de la tesis es apropiada, clara lo cual ha permitido una lectura fluida y amena; el estilo de lenguaje y terminología específica es adecuado. Las ilustraciones son las necesarias, prolijas y claras; las fotografías de las zonas de estudio y de perfiles de suelos estudiados son de calidad y podrían de ser posible incrementarse en alguna de mayor visibilidad de la distribución areal de los hormigueros en la zona de estudio, Esta tesis, se considera original, meritoria y que ha generado una amplia base de datos con resultados novedosos a ser aplicados en estudios similares en otros sectores de la zona y del país. Además como todo trabajo de tesis es la base para futuras líneas de nuevos trabajos a desarrollar en el futuro, por todo lo expuesto la considero APROBADA.

Prof^a Dr^a MARGARITA LUISA OSTERRIETH
Universidad Nacional de Mar Del Plata

Modelo 1 - Para membros de Banca Examinadora de Programa de Pós-graduação da UNIOESTE



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



PARANÁ
GOVERNO DO ESTADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DECLARAÇÃO E PARECER DE PARTICIPAÇÃO EM BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE MESTRADO REALIZADA À DISTÂNCIA, DE FORMA SÍNCRONA, POR VIDEOCONFERÊNCIA

Eu, **Prof. Dr. Marco Madella**, declaro que **participei à distância, de forma síncrona e por videoconferência**, da Banca Examinadora de Defesa de Dissertação da candidata **Carolina Glaeser Benincá**, aluna de Mestrado deste Programa de Pós-Graduação.

Considerando o trabalho entregue, apresentado e a arguição realizada, **formalizo como membro externo**, para fins de registro, por meio desta declaração, minha decisão de que a candidata pode ser considerada **APROVADA** na banca realizada em 27/06/2024, com o trabalho intitulado **"Efeito de formigas do gênero Atta (Hymenoptera: Formicidae) na composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos de um Latossolo: um estudo em micro e macro escala"**.

Descreva abaixo observações e/ou restrições (se julgar necessárias):

**Marco
Madella**

Digitally signed by
Marco Madella
Date: 2024.07.02
03:53:29 +02'00'

Prof^o Dr^o MARCO MADELA
Universitat Pompeu Fabra

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais Elisangela e Edir e ao meu irmão Luís Henrique, pelo amor e apoio incondicionais, por todos os esforços investidos em minha educação e por serem meu maior referencial.

À minha orientadora Dra. Marcia Regina Calegari, por me instruir nesta jornada, por toda atenção dispensada e por todas as portas abertas. Pelo grande exemplo como professora e pesquisadora.

Agradeço à Fundação Araucária pelo financiamento da pesquisa (convênio nº 341/2022) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Ministério da Educação pela concessão de bolsa de Mestrado.

A todos os professores que acompanharam minha formação profissional, em especial ao Colegiado do curso de Pós-Graduação Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), *campus* Marechal C. Rondon, pelos recursos dispensados a realização de análises e ao meu aperfeiçoamento técnico e intelectual.

À professora Dra. Vanda Pietrowski, do curso de Agronomia da Unioeste, pelas orientações sobre as saúvas e pelo apoio técnico em campo.

À Associação Técnica das Indústrias de Mandioca do Paraná – ATIMOP por ceder acesso ao local de estudo e pela colaboração nas atividades de campo.

Ao professor Dr. Ericson Hayakawa, Dra. Christiane Fonseca, Me. Altair Bennert e Me. Patrícia Perdoná pela participação nos trabalhos de campo.

À professora Dra. Maria do Carmo Lana e ao técnico Jucenei Frandoloso, do curso de Agronomia da Unioeste, por cederem espaço e coordenarem as etapas de análises químicas no Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas.

Aos professores Dr. Pablo Vidal-Torrado e Dr. Miguel Cooper, do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior em Agricultura “Luiz de Queiróz” (ESALQ/ USP), pelos ensinamentos enriquecedores, orientações e apoio nas análises laboratoriais.

Aos técnicos do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/ USP, Sônia, Chiquinho, Ednéia e Rossi, por suas contribuições às análises micromorfológicas, químicas e físicas de solos.

Ao professor Dr. Plinio de Camargo e aos técnicos do Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/ USP) pela cooperação nas análises isotópicas.

Ao professor Dr. Luiz Carlos Pessenda e à equipe do Laboratório de Carbono 14 do CENA/ USP pela colaboração na realização das datações ^{14}C .

Ao professor Dr. Edmar de Vasconcelos, do curso de Agronomia da Unioeste, pela assistência às análises estatísticas.

À professora Dra. Margarita Osterrieth e ao Dr. Bruno da Silva pelas avaliações e contribuições feitas a esta dissertação na banca de qualificação.

Aos queridos amigos fitoliteiros Chris, Thairís, Bruna, Amandinha, Jonathan e Luciane pela parceria nos estudos, carinho e risadas compartilhadas no laboratório.

Aos amigos da Geografia e do Laboratório de Estudos da Dinâmica Ambiental – LEDA, em especial ao Jeferson, Altair e Vanderson pelo convívio, partilha de conhecimentos e pelo cafezinho.

Aos colegas da salinha e das disciplinas de Gênese e Micromorfologia que me acolheram em Piracicaba, em especial Ana, Thiago e Dani pelo abraço e encorajamento nos momentos difíceis.

Aos meus queridíssimos primos Alexsia e Lucas, pelo incentivo descomedido, carinho e bom-humor sempre.

Ao meu querido Luan, pelo incentivo constante, entusiasmo, carinho e dedicação. Por estar sempre ao meu lado, ajudando-me a superar vários obstáculos, tornando esta jornada mais leve.

Sinto-me grata e honrada por todas as oportunidades e experiências vivenciadas ao longo deste processo, que me proporcionaram aprendizados ímpares, evolução pessoal e profissional! Agradeço a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa.

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AMS	<i>Accelerator Mass Spectrometry</i>
AP	Antes do presente
Cal.	Calibrada
Cfa	Clima subtropical úmido
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
D/P	índice de Cobertura Arbórea
DSI	Índice de Dessilicação
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FESD	Floresta Estacional Semidecidual
FIA	Fração Insolúvel ao Ácido
Fs	Índice de Stress Hídrico
GSSCP	<i>Grass Silica Short Cell Phytolith</i>
Ic	Índice Climático
ICPN	<i>International Code for Phytolith Nomenclature</i>
Iph	Índice de Adaptação a Aridez
Itaf	índice de Tafonomização
Ki	Índice de Intemperismo
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
P1	Perfil 1
P2	Perfil 2
PDB	Padrão Belemnitella Americana da Formação Pee Dee
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
STI	Índice Sílica-Titânia
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
V%	Saturação por Bases

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área do Estudo	39
Figura 2: Disposição dos perfis de solo estudados	42
Figura 3: Contagem fitólito X não fitólito	52
Figura 4: Aspecto do sauveiro e panelas	55
Figura 5: Blocos polidos e lâminas delgadas sob luz UV	60
Figura 6: Trama porfírica	61
Figura 7: Extensão de um bioporo produzido por saúvas	62
Figura 8: Bioporo com preenchimento solto contínuo	63
Figura 9: Seção transversal de raízes	64
Figura 10: Porosidade total dos blocos polidos	65
Figura 11: Paredes picotadas em bioporos sem preenchimento	66
Figura 12: Bioporos com paredes picotadas sem e com preenchimento de microagregados	67
Figura 13: Corte transversal em panela de resíduos	68
Figura 14: Restos vegetais com esqueletos de sílica (articulados de fitólitos) encontrados na panela de resíduos	69
Figura 15: Restos vegetais com esqueletos de sílica.	70
Figura 16: Valores de Carbono Orgânico Total em P1 e P2 e materiais do formigueiro.....	72
Figura 17: Variação Isotópica $\delta^{13}C$ em P1 e P2 e materiais do formigueiro..	72
Figura 18: Concentração de fitólitos no P1.....	73
Figura 19: Concentração de fitólitos no P2.....	74
Figura 20: Morfotipos de fitólitos dos perfis de solo	76
Figura 21: Articulados de fitólitos encontrados na serrapilheira e panelas dos formigueiros.....	77
Figura 22: Composição da assembleia fitolítica em P1 e P2 por família e subfamília de plantas	79
Figura 23: Taxa de fitólitos tafonomizados em P1 e P2	81
Figura 24: Galerias com preenchimentos ao longo do P2.....	82
Figura 25: Tafonomia por Morfotipo de fitólito (quebra e corrosão)	82
Figura 26: Exemplos de Fitólitos Tafonomizados	83
Figura 27: Grupos taxonômicos presentes na assembleia de fitólitos.....	84

Figura 28: Agrupamentos de amostras conforme semelhanças na assembleia fitolítica	84
Figura 29: Relação dos morfotipos de fitólitos e agrupamentos das amostras (P1, P2, materiais do formigueiro e serrapilheira)	86
Figura 30: Agrupamentos de amostras conforme semelhanças entre os dados da análise multiproxy.....	87
Figura 31: Agrupamentos das amostras de P1, P2 e materiais do formigueiro	88
Figura 32: Relação das variáveis grupo taxonômico, isótopos ¹³ C, COT, relação C/N, microcarvões e morfotipos sem família definida.....	89
Figura 33: Agrupamentos de amostras conforme semelhanças entre os dados das assembleias de fitólitos de P1 e P2.....	90
Figura 34: Relação famílias e subfamílias de plantas identificadas na assembleia fitolítica de P1 e P2.....	91
Figura 35: Agrupamentos das amostras de P1, P2 e topo do formigueiro	91
Figura 36: Frequência relativa da assembleia de fitólitos, índices fitolíticos e isotópicos do P1	95
Figura 37: Frequência relativa da assembleia de fitólitos, índices fitolíticos e isotópicos do P2	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de amostras coletadas para análise micromorfológica. ...	46
Tabela 2: Classificação dos poros conforme tamanho e forma – SPIA.	47
Tabela 3: Relação de amostras enviadas para datação.	48
Tabela 4: Atributos físicos dos horizontes do P1 e materiais do formigueiro do P2.....	56
Tabela 5: Atributos químicos dos horizontes do P1 e materiais do formigueiro do P2.....	58
Tabela 6: Índices de Intemperismo.....	59
Tabela 7: Idades radiocarbono ¹⁴ C.....	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 Fitólitos aplicados à Reconstituição Paleoambiental.....	26
2.2 Impactos da bioturbação na composição, distribuição e preservação dos fitólitos no solo.....	29
2.3 Análise isotópica da matéria orgânica do solo ($\delta^{13}\text{C}$) e datação ^{14}C: técnicas complementares a análise de fitólitos no solo	35
2.4. Micromorfologia.....	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Área do Estudo	39
3.2 Trabalho de campo e coleta.....	41
3.3 Análises laboratoriais.....	43
3.3.1 Análises físicas de rotina	43
3. 3. 2 Análises Químicas de Rotina.....	44
3. 3. 3. Índices Geoquímicos	44
3.4 Micromorfologia.....	45
3.4.1 Descrição micromorfológica.....	45
3.4.2 Quantificação da porosidade em blocos polidos.....	46
3.5 Análise Isotópica	47
3.6 Datações ^{14}C da MOS	48
3.7 Análise Fitolítica	49
3.7.1 Extração de fitólitos do solo e serrapilheira.....	49
3.7.2 Identificação, contagem e classificação das assembleias de fitólitos	50
3.7.3 Contagem fitólitos/ grama de solo:	52

3.8 Análise estatística	53
4. RESULTADOS.....	54
4.1 Caracterização do solo	54
4.1.1 Caracterização Macromorfológica e Físico-Química	54
4.1.2 Caracterização Micromorfológica.....	59
4.2 Idade ¹⁴ C, Carbono Orgânico Total (COT) e δ ¹³ C.....	71
4.3 Análise Fitolítica	73
4.3.1 Caracterização da FIA.....	73
4.3.2. Constituição e tafonomização das assembleias de fitólito.....	75
4.3.3. Efeito da atividade do saubeiro na assembleia de fitólitos.....	83
5. DISCUSSÃO	98
5.1 O solo como reservatório de fitólitos	98
5.2 Composição, distribuição e preservação de fitólitos no solo: influências biológicas e implicações na pedogênese.....	99
5.3 Efeito das formigas <i>Atta</i> no registro fitolítico	102
5.4 Mudanças Paleoambientais e dinâmica da vegetação do Holoceno médio aos dias atuais	104
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
REFERÊNCIAS	109
APÊNDICES	122

RESUMO

Influência da ação de formigas *Atta* na distribuição e preservação da assembleia de fitólitos de um Latossolo: um estudo em micro e macro escala

A investigação das assembleias de fitólitos remanescentes nos solos e sedimentos é reconhecida como uma fonte abundante de informações confiáveis acerca da vegetação pretérita, sendo amplamente aplicada em estudos paleoambientais por todo o mundo. Os fitólitos são microrrestos vegetais compostos por sílica hidratada frequentemente preservados em solos e sedimentos. Sua durabilidade, abundância e morfologias diagnósticas os tornam *proxies* ambientais seguros, sobretudo quando aliados a outros marcadores biológicos, físicos e/ou químicos. A preservação, conservação e distribuição dos fitólitos no solo estão condicionadas a inúmeros fatores e processos ambientais que podem impactar a tafonomia dessas células, gerando perturbações em sua distribuição natural e morfologia. Conhecer o contexto em que os fitólitos estão depositados é imprescindível para evitar interpretações superficiais ou errôneas, uma vez que eles estão sujeitos a degradação e movimentação por escoamento superficial em curtas distâncias, movimentação lateral e vertical dentro do solo em virtude de interações solo-planta-soluto, processos hidrológicos dos solos e bioturbação. Os efeitos físicos da fauna sobre o solo incluem mistura, empilhamento e enterramento de solo, além de causar alterações no balanço químico dos solos a partir do carregamento de restos animais e plantas para baixo do solo onde se decompõem. Além disso, afetam a estrutura física do solo através da construção de montes, galerias e ninhos, interferem nos padrões de porosidade e na constituição e destruição de agregados do solo. Apesar de reconhecido, o impacto da bioturbação e sua relação com a distribuição e conservação da sílica biogênica no perfil de solo ainda é pouco compreendido, especialmente em regiões tropicais que apresentam alta atividade biológica nos solos. Neste sentido, esta dissertação pretende contribuir com o entendimento dos efeitos da bioturbação promovida pelas colônias de formigas saúvas (*Atta*) sob a assembleia de fitólitos dos solos por meio da identificação e descrição dos efeitos desses insetos na distribuição e preservação das assembleias de fitólitos e seus possíveis impactos nas interpretações paleoambientais. A área de estudo foi selecionada no oeste paranaense, região com predomínio de Latossolos, solos cuja gênese está intimamente relacionada a atividade biológica e a altas taxas de intemperismo. No local, foram escolhidos dois perfis próximos, um para efeito de referência e outro sob a atividade de uma colônia de saúvas (gênero *Atta* *Hymenoptera: Formicidae*). Verifica-se que, na área estudada os impactos da atividade das formigas não chegaram a alterar o padrão natural (de referência) de distribuição e preservação dos fitólitos a ponto de interferir significativamente na interpretação paleoambiental. Entretanto, nota-se que as saúvas transportam material mineral intraperfil verticalmente, além de promoverem o *input* de material vegetal fresco e *output* de materiais residuais, todos podendo conter assembleias variadas de fitólitos. Além disso, verificaram-se valores mais elevados e padrão de distribuição mais irregular no número de fitólitos tafonomizados do perfil sob colônia de formigas em relação ao perfil de referência e alterações na linearidade dos dados isotópicos em profundidade.

Palavras-chave: Fitólitos; Bioturbação; Tafonomia; Latossolos.

ABSTRACT

Influence of *Atta* ant activity on the distribution and preservation of phytolith assemblages in an Oxisol: a micro and macro scale study

The investigation of phytolith assemblages of soils and sediments is widely recognized as an abundant source of reliable information about past vegetation, being extensively applied in paleoenvironmental studies worldwide. Phytoliths are plant microfossils made of hydrated silica that are frequently preserved in soils and sediments. Their durability, abundance, and diagnostic morphologies make them reliable environmental proxies, especially when combined with other biological, physical, and/or chemical markers. The preservation, conservation, and distribution of phytoliths in soil are conditioned by numerous environmental factors and processes that can impact the taphonomy of these cells, causing disturbances in their natural distribution and morphology. Understanding the context in which phytoliths are deposited is essential to avoid superficial or erroneous paleoenvironmental interpretations, as they are subject to degradation and movement due to surface runoff over short distances, lateral and vertical movement within the soil due to soil-plant-solute interactions, soil hydrological processes, and bioturbation. The physical effects of soil fauna include mixing, stacking, and burying of soil, they also affect the soil's chemical balance transporting animal and plant remains to deeper soil layers where they decompose. Additionally, they affect the physical structure of the soil through the construction of mounds, galleries, and nests, altering porosity patterns and the formation and destruction of soil aggregates. Although recognized, the impact of bioturbation and its relationship with the distribution and conservation of biogenic silica in the soil profile is still poorly understood, especially in tropical regions where biological activity in soils is high. In this context, this dissertation aims to contribute to the understanding of the effects of bioturbation promoted by leafcutter ants (*Atta Hymenoptera: Formicidae*) colonies on the soil's phytolith assemblage by identifying and describing the effects of these insects on the distribution and preservation of phytolith assemblages and their possible impacts on paleoenvironmental interpretations. The study area selected is in western Paraná, a region with a predominance of Oxisols, whose genesis is closely related to biological activity and high weathering rates. Two nearby profiles were chosen, one for reference and the other under the activity of leafcutter ant' colony. The results show that in the studied area, the impacts of ant activity did not significantly alter the natural (reference) pattern of phytolith distribution and preservation to the point of significantly interfering in paleoenvironmental interpretations. However, it is noticeable that leafcutter ants transport mineral material vertically within the profile, in addition to promoting the input of fresh plant tissues and the output of residual materials, all potentially containing varied phytolith assemblages. Additionally, higher values and a more irregular distribution pattern were observed in the number of taphonomized phytoliths of the profile under the ant's colony compared to the reference profile, as well as alterations in the linearity of isotopic data in depth.

Keywords: Phytoliths; Bioturbation; Taphonomy; Oxisols.

1. INTRODUÇÃO

A preservação, conservação e, sobretudo, a distribuição da assembleia de fitólitos no solo está diretamente ligada às condições edáficas às quais elas são submetidas ao longo do tempo (Piperno, 1988; Osterrieth *et al.*, 2009; Madella; Lancelotti, 2012). Dentre os processos que podem afetar a assembleia fitolítica no solo, destaca-se a ação da macrofauna do solo que ainda é pouco compreendida, sobretudo em ambientes tropicais.

Fitólitos são microrrestos vegetais preservados em solos e sedimentos (Piperno, 2006). Sua durabilidade, abundância e morfologias diagnósticas os tornam marcadores ambientais confiáveis, sobretudo quando associados a outros indicadores biológicos, químicos ou físicos (Piperno, 1988), especialmente em solos minerais não hidromórficos e/ou em zonas de baixa disponibilidade hídrica, onde o fitólito pode ser o único *proxy* biológico disponível para análise paleoambiental (Fonseca, 2023). Apesar da significativa quantidade de estudos realizados utilizando a análise fitolítica, são poucos aqueles dedicados à compreensão dos efeitos da bioturbação na assembleia de fitólito e seu significado paleoambiental. Por isso, este estudo parte da hipótese de que a atividade da macrofauna, em especial, a das formigas cortadeiras, pode afetar a formação, distribuição e preservação das assembleias de fitólitos contidas no solo.

Sabe-se que, ao integrar o solo, a assembleia de fitólitos está sujeita aos inúmeros processos atuantes sobre ele. Desta forma, a aplicação deste *proxy* exige um profundo entendimento acerca de suas propriedades morfológicas, químicas e físicas e suas relações com o solo onde podem estar contidos por longos períodos. Isso pode evitar interpretações equivocadas, uma vez que os fitólitos estão sujeitos a degradação e movimentação pelo escoamento superficial a distâncias curtas em superfície (Cary *et al.* 2018) e pelo vento (Funk *et al.* 2022); além da movimentação lateral e vertical dentro do solo devido às interações solo-planta-água (Fishkis; Ingwersen; Streck, 2010a; 2010b; Liu *et al.*, 2020) e à bioturbação (Fishkis *et al.*, 2010b; Humphreys *et al.* 2003; Hart; Humphreys, 2003).

A bioturbação, especialmente a ação das formigas cortadeiras sobre a assembleia fitolítica, tem sido pouco estudada. As formigas, assim como outros

animais que compõem a macrofauna do solo, desempenham um papel significativo na movimentação de partículas, selecionando frequentemente as frações de solo em que os fitólitos são encontrados (silte e argila) (Hole, 1981; Moreira *et al.* 2004; Martins, 2007).

Esse processo de reorganização pode promover a haploidização (mistura do solo) (Schaetzl; Anderson, 2005) e a consequente transferência de partículas entre horizontes pedológicos, inclusive de fitólitos, reorganizando as estruturas em macro e microescala (Hole, 1981; Lobry de Bruyn; Conache, 1995). Dependendo do grau de mobilização de fitólitos no perfil, ruídos podem ser produzidos na interpretação da assembleia, comprometendo os resultados sobre as informações paleoambientais de uma dada área.

O impacto da bioturbação, particularmente das formigas cortadeiras, na estrutura dos solos pode ser evidenciada pela ocorrência de pedotúbulos, canais com preenchimentos, ninhos, câmaras e montículos visíveis a olho nú (macromorfologia). E, por meio da análise micromorfológica, pode-se observar com riqueza de detalhes as feições relacionadas aos processos pedogenéticos, inclusive aqueles resultantes da atividade biológica. Em ambas as escalas, constata-se a atuação destes organismos na produção e reorganização de agregados e poros do solo (Woodburn, 2012; Chiapini, 2021; Neto, 2019) e potencialmente sobre a assembleia de fitólitos e as informações paleoambientais que elas transmitem (Hart, 2003).

Apesar do evidente impacto da atividade da fauna nos solos (Valério, 2006), sua relação com a distribuição e conservação da sílica biogênica ainda é pouco conhecida (Jouquet *et al.*, 2020), sobretudo em regiões tropicais e subtropicais onde ocorre atividade biológica em alto grau nos solos. Nesse sentido, o presente estudo tem como hipótese que a atividade das colônias de formigas do gênero *Atta* (*Hymenoptera: Formicidae*), popularmente conhecidas como cortadeiras, ou “saúvas-limão”, impacta a composição, distribuição e preservação das assembleias de fitólitos no solo, devido ao seu hábito de forrageamento, que pode promover o *input* de material vegetal rico em fitólitos e as ações de revolvimento do solo durante o estabelecimento, manutenção e expansão de sua colônia. Moreira *et al.* (2004) relatam que a quantidade de terra removida por estas formigas pode chegar a mais de 40 toneladas de solo e os efeitos das perturbações causadas por um ninho dessas formigas podem

permanecer evidentes por até cerca de 15 anos após a morte da colônia (Bieber *et al.*, 2011; Leal *et al.*, 2012).

Considerando a lacuna nos conhecimentos a respeito da ação da atividade biológica nas assembleias de fitólitos em zonas tropicais, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: as formigas *Atta* (*Hymenoptera: Formicidae*) alteram a composição, distribuição e preservação dos fitólitos em solos intemperizados em zona tropical? Para responder esta pergunta foram selecionados dois perfis de Latossolos Vermelho de textura muito argilosa na borda de um fragmento de mata secundária replantada na região Oeste do Paraná, sob clima subtropical Cfa, onde predominava como vegetação natural a Floresta Estacional Semidecidual (FESD). Foram selecionados: um perfil de referência, com atividade biológica comum, e um perfil sob um formigueiro de saúvas ativo. Foram realizadas análises de caracterização do solo e paleoambientais, para entender o grau do impacto gerado pela dinâmica desses insetos.

Ao considerar a hipótese e a questão central proposta, esta pesquisa tem como objetivo geral:

Identificar e descrever os efeitos da ação de formigas (*Atta Hymenoptera: Formicidae*) sobre a composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos do solo (em micro e macro escala) e seus possíveis impactos em interpretações paleoambientais.

Especificamente objetiva-se: 1) Identificar as feições macro e micromorfológicas da atividade das formigas; 2) Caracterizar as assembleias de fitólito extraídas dos solos e dos diferentes materiais do formigueiro; 3) Identificar misturas entre os conjuntos de fitólitos modernos e dos perfis em profundidade; 4) Reconstituir a trajetória da vegetação ao longo do Holoceno médio (Northgrippiano) na área de estudo.

Como produto desta pesquisa, o presente documento está estruturado com um Referencial Teórico que aborda a aplicação dos fitólitos em estudos paleoambientais, a bioturbação enquanto fenômeno pedológico e seus possíveis impactos sobre a assembleia de fitólitos. Ademais, trata das técnicas de análise isotópica, datação ^{14}C e micromorfologia de solos, como técnicas complementares à análise de fitólitos no solo. Na sequência, estão descritos os

Materiais e Métodos empregados na presente pesquisa, incluindo detalhes sobre a área de estudo, procedimentos de campo, laboratoriais e de gabinete.

Os Resultados são apresentados a partir da caracterização macromorfológica e físico-química do solo, seguido pela descrição de aspectos micromorfológicos. Após, constam os resultados relativos à idade ^{14}C , Carbono Orgânico Total (COT) e isótopos $\delta^{13}\text{C}$. A seção de resultados se encerra com a análise fitolítica das assembleias dos solos, serrapilheira e painéis dos formigueiros, com foco em aspectos de composição e tafonomia destas, além da definição de zonas fitolíticas que refletem diferentes momentos ambientais nos perfis estudados.

A Discussão reúne informações de estudos nacionais e internacionais que apoiam aqueles encontrados nesta pesquisa, relacionando o solo como reservatório de fitólitos, o efeito das formigas *Atta* no registro fitolítico e a dinâmica da vegetação do Holoceno médio aos dias atuais.

Conclui-se esta dissertação com uma síntese dos achados alinhando-os aos objetivos e à questão central deste trabalho, além de propor direções para pesquisas futuras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O solo é um ecossistema complexo, um corpo natural e dinâmico constituído por materiais minerais e orgânicos, acumulados ao longo do tempo e sujeitos a transformações em sua estrutura e composição. Os solos refletem condições climáticas, geológicas, e geomorfológicas locais e regionais e podem ser concebidos como portadores de memórias ambientais, testemunhas da evolução da paisagem (Bigarella *et al.*, 1994; Targulian, 2004; Janzen, 2016).

A memória do solo, segundo Targulian e Goryachkin (2004), é intrínseca à pedogênese, e a cronodiversidade dos solos permite resgatar informações de seus ambientes de formação e dos processos de esculturação da paisagem (Maack, 1981; Bigarella *et al.*, 1994). Através de estudos e técnicas interdisciplinares, como a de Reconstituição Paleoambiental, é possível explorar as memórias preservadas nos solos, elucidando as dinâmicas sob as quais os espaços naturais evoluíram.

Para tal, faz-se necessário obter indicadores (*proxies*) em solos, sedimentos ou material fóssil, que apontem as qualidades ambientais pretéritas. Em decorrência da diversa composição dos solos, depósitos e fósseis, técnicas e métodos particulares são empregados a fim de extrair uma ampla gama de informações paleoambientais, que permitam realizar uma análise robusta em uma abordagem *multiproxy* (Villalba; Grosjean; Kiefer, 2009).

Marcadores biológicos como fitólitos, grãos de pólen, espículas de esponjas e diatomáceas podem ser empregados em estudos paleoambientais, dependendo de sua disponibilidade no ambiente (Salgado-Laboriau, 2006). Dentre as técnicas e bioindicadores citados, a aplicação da análise da assembleia de fitólitos tem se destacado no Brasil e em paisagens tropicais como uma (Luz *et al.*, 2015).

Uma vez incorporados aos solos, os fitólitos passam a fazer parte da matriz mineral, ficando suscetíveis a todos os processos edáficos, inclusive a ação da fauna no perfil de solo. Os organismos da macrofauna do solo são importantes componentes da biota e atuam como engenheiros do ecossistema, fragmentadores e transformadores da serrapilheira. São também, sobretudo em zonas tropicais, importantes mobilizadores de fitólitos dentro do perfil de

solo. Nesse sentido, a revisão bibliográfica que segue, visa aportar informações sobre essa temática, para subsidiar o desenvolvimento do estudo em tela.

2.1 Fitólitos aplicados à Reconstituição Paleoambiental

Os fitólitos (do grego *Φύτον*, planta + *λίθος*, pedra) foram identificados no século XIX, porém, só começaram a ser empregados nas ciências como bioindicadores a partir da década de 1970, com aplicações em trabalhos produzidos por arqueobotânicos e para reconstituição paleoambiental, tanto de clima e como de vegetação (Piperno, 2006; Rovner, 1971; Twiss; Suess; Smith, 1969).

Os fitólitos, ou silicofitólitos, são biomineralizações amorfas de sílica hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), produzidas por certas plantas, a partir da absorção, deposição e acúmulo da sílica dentro e entre as células do tecido vegetal, sobretudo na epiderme das plantas, durante o seu ciclo vegetativo (Piperno, 2006). Estes microcorpúsculos possuem dimensões que variam entre 2 μm e 1000 μm , com maior ocorrência entre 20 μm e 200 μm (Piperno, 2006; Rovner, 1971; Wilding *et al.*, 1977).

Conforme Pearsall (2016), a formação de fitólitos nas plantas compreende uma gama de mecanismos. O ácido monossilícico disponível no solo pode ser obtido ativamente segundo as necessidades fisiológicas e metabólicas da planta, ou, pode ser absorvido passivamente via corrente de transpiração. A transformação desse ácido e sua solidificação em dióxido de silício (SiO_2) é um processo complexo que ocorre em função da transpiração e da perda de água, que promovem a precipitação da sílica no tecido vegetal (Epstein, 1999, 2001).

A sílica assume sua posição dentro de cada planta seguindo princípios genéticos e fisiológicos que designam as áreas ideais para acúmulo, visando cumprir funções estruturais, fisiológicas ou de defesa (Savant; Snyder; Datnoff, 1996). Ocorre também a deposição passiva da sílica, condicionada por aspectos edafoclimáticos locais (Epstein, 2009; Pearsall, 2016). Assim, os morfotipos assumem a forma das células em torno das quais a sílica foi depositada, expressando aspectos variáveis da anatomia vegetal preservada (ICPT *et al.*, 2019).

Com a morte da planta, ou de parte dela, e a decomposição do material orgânico, os fitólitos são liberados e podem ser incorporados aos solos e sedimentos, fazendo parte da matriz (Wilding *et al.*, 1977). Sua conservação no ambiente edáfico está condicionada a condições de pH entre 3 e 9 (Piperno, 2006). Considerando que a maioria dos solos, sobretudo em zonas tropicais, possui pH entre 5,0 e 6,5, (Ker *et al.* 2012) tem-se no solo condições ótimas para preservação dos fitólitos permitindo empregá-los como *proxies* em estudos paleoambientais.

Os fitólitos possuem morfologias distintas com valor taxonômico que possibilitam a identificação de sua planta de origem, na ordem de Famílias, Subfamílias e Taxa (; Twiss; Suess; Smith, 1969; Rovner, 1971; Piperno, 2006; Pearsall, 2016; ICPT *et al.*, 2019). Os morfotipos se distinguem em formas, tamanhos e estruturas em decorrência da deposição da sílica em diferentes células vegetais (variando conforme as Famílias) e da idade da planta (Twiss, 1992). Além das morfologias diagnósticas, os fitólitos também se caracterizam pela sua durabilidade (resistência e conservação da opala biogênica nos solos) e por sua abundância, fator que permite a comparação com espécies vivas e a identificação de famílias de plantas (Piperno, 1988).

O estudo do conjunto de morfotipos de fitólitos armazenado em um reservatório (solo ou sedimento), permite estabelecer índices que sustentam a interpretação das condições pretéritas do ambiente como o Índice de Adaptação a Aridez (Iph) que aporta informações sobre disponibilidade hídrica no ambiente; o Índice Climático (Ic) que marca as variações de temperatura (Twiss, 1992) e o Índice de Cobertura Arbórea (D/P) que permite distinguir ambientes mais ou menos florestados (Alexandre; Meunier, 1997; Bremond *et al.*, 2005) e o Índice de tafonomização, que fornece dados acerca da preservação dos fitólitos no solo (Marcolin, 2022; Fonseca, 2023; Santos, 2023). A aplicação destes índices tem enriquecido as análises paleoambientais, como as realizadas por Bremond *et al.* (2005), Twiss (1992), Calegari *et al.* (2017), Coe *et al.* (2014) e Silva Neto *et al.* (2018).

Ademais, a partir da extração de fitólitos de plantas atuais são criadas coleções de referência de fitólitos modernos. As coleções são fundamentais para o conhecimento da produção de fitólitos por diferentes Espécies, Gêneros e Famílias vegetais, permitindo conhecer o *fingerprint* destas, isto é, a

assinatura fitolíticas das plantas e fitofisionomias. Assim, conhecendo a assembleia de fitólitos das fitofisionomias atuais, é possível estabelecer relações e comparações com aquelas preservadas nos solos e então inferir as características da estrutura de vegetações pretéritas, empregando o princípio do uniformitarismo de Hutton “o presente é a chave do passado” (Hutton, 1795).

As coleções de referência de plantas modernas ajudam a minimizar os ruídos nas interpretações da assembleia de fitólitos preservadas nos solos, pois permitem conhecer os níveis de redundância e multiplicidade da produção de fitólitos de cada tipo de planta (Rovner, 1971). A redundância diz respeito à produção de um mesmo morfotipo de fitólito por diversos *taxa* de plantas, enquanto a multiplicidade, aponta para o fato de uma mesma planta produzir vários morfotipos distintos (Rovner, 1971). Além disso, os fitólitos estão sujeitos a movimentação e translocação no perfil de solo, provocadas por agentes como água, vento e animais (Piperno, 1988; Osterrieth, 2009; Madella; Lancelotti, 2012), entre outros processos que ocorrem a nível de paisagem e solo.

A preservação da assembleia de fitólitos no solo está condicionada a processos tafonômicos que envolvem ataques químicos (dissolução da sílica) e físicos (transporte por bioturbação ou translocação no perfil) (Osterrieth, *et al.* 2009; Madella; Lancelotti, 2012). Inicialmente, acreditava-se que os fitólitos permaneciam imóveis após sua deposição no substrato, porém, o movimento vertical dos fitólitos no perfil tem sido constatado em diferentes classes de solo (Madella; Lancelotti, 2012; Calegari *et al.*, 2013; Marcolin *et al.*, 2023; Runge, 1999) por meio de experimentos realizados em laboratório e em campo (Fishkis *et al.*, 2009, 2010a, 2010b).

Em geral, há maior concentração de fitólitos nos horizontes superficiais, havendo um decréscimo linear em profundidade (Alexandre *et al.*, 1997), tal distribuição é tida como padrão (Alexandre *et al.*, 1997; Runge, 1999; Hart *et al.*, 2003). Sendo assim, quando uma maior concentração de fitólitos é identificada em profundidade, esta é frequentemente interpretado como um sinal de mudança na cobertura vegetal (Hart *et al.*, 2003; 2004) ou horizonte enterrado (Marcolin *et al.*, 2023). Neste cenário, é necessário atentar-se para a possibilidade da movimentação e translocação dos fitólitos dentro do perfil, considerando os atributos do solo, as condições ambientais e de fauna que

circulam e permeiam o solo, influenciando na distribuição e preservação da assembleia.

2.2 Impactos da bioturbação na composição, distribuição e preservação dos fitólitos no solo

O solo é o principal reservatório de fitólitos na paisagem em condições naturais. Diversas plantas e animais buscam obter recursos e proteção contra intempéries e predadores dentro do solo. Ao penetrar o solo, vertical e horizontalmente, eles influenciam diretamente a estrutura do solo, a partir da escavação e da translocação de material intraperfil. Ademais, a ação da biota do solo também afeta indiretamente a biogeoquímica e o movimento da água no perfil (Gabet; Reichman; Seabloom, 2003).

No escopo da Ciência do Solo, os efeitos da bioturbação foram por muitos anos subestimados. Seu potencial foi identificado inicialmente por Darwin (1881), que reconheceu sua influência pedogenética e geomorfológica. A partir daí, o estudo da bioturbação se intensificou e no final do século XX passou a ser entendida como um mecanismo chave da pedogênese (Wilkinson; Richards; Humphreys, 2009).

A pedoturbação é um fenômeno formador de solo, faz parte do processo de haploidização, caracterizado pela mistura de materiais sólidos por água, gases, gelo, atividades antrópicas, e pela biota (Hole, 1961; Wilkinson; Richards; Humphreys, 2009). A ação destes últimos pode ser caracterizada como bioturbação. Ireson e Butler (2009) definem a bioturbação como a movimentação de material sólido no perfil de solo através das ações da flora e da fauna do solo. A atividade da fauna edáfica resulta, na maioria dos casos, no transporte horizontal dos componentes do solo e, sobretudo, verticalmente, contra a gravidade e o fluxo da água.

A biota, especialmente a macrofauna, retrabalha o solo misturando, amontoando e enterrando seus constituintes, o que contribui significativamente com suas propriedades como a textura, consistência, agregação e porosidade (Lee; Foster, 1991). Também atua na decomposição e mineralização da matéria orgânica, no revolvimento e amontoamento de partículas, na construção de montículos, galerias e ninhos, e na formação de grandes poros.

Além disso, a macrofauna pode regular a erosão, interferir na formação e na degradação da serrapilheira, facilitar o movimento da água e do ar dentro do solo e regular os ciclos dos nutrientes (Hole, 1981; Gabet; Reichman; Seabloom, 2003; Wilkinson; Richards; Humphreys, 2009; Miklós, 2012). As alterações causadas por esses organismos, seu grau de seletividade em relação às partículas e a posição de suas escavações definem se a bioturbação é proanisotrópica ou proisotópica¹ (Hole, 1961; Johnson; Watson-Stegner, 1987).

A biota do solo é composta por diversos organismos, como formigas, cupins, minhocas, aracnídeos, artrópodes, centopeias, fungos, bactérias, protozoários e nematoides, além de aves, répteis, anfíbios e mamíferos como o tatu, que atuam sobre o solo em diferentes escalas espaciais e temporais (Miklós, 2012; Jouquet *et al.*, 2020). Dentre a macrofauna edáfica (invertebrados maiores que 2mm), destacam-se as formigas, cupins e minhocas, conhecidos como “engenheiros de ecossistemas”, cuja dinâmica influencia na estrutura física do solo e no fluxo de nutrientes e energia (Wilkinson; Richards; Humphreys, 2009; Coleman; Wall, 2015). As atividades destes engenheiros podem atingir algumas dezenas de metros de profundidade, formando uma camada denominada biomanto, definida como uma zona homogênea produzida pela bioturbação e processos subsidiários (Johnson, 1990).

Dentre os organismos da macrofauna do solo destacam-se as formigas cortadeiras, ou, saúvas, por serem insetos sociais que possuem um sistema complexo de comunicação via feromônios, e organização em um sistema de castas com funções específicas dentro da colônia. Sua atividade está associada à redistribuição da matéria orgânica, de elementos minerais e frações de solo. Esses animais movimentam o solo, escavando grandes quantidades de materiais e depositando partes de estratos profundos sobre a superfície, onde elaboram suas colônias (Miklós, 2012; Jouquet *et al.*, 2020). Dessa forma, alteram a estrutura física do solo através da bioturbação, além de afetarem a química do solo através da movimentação de restos vegetais ou

¹ Proanisotrópica favorece a diferenciação de horizonte e proisotrópica impede a formação de horizonte ou tende a homogeneizar dois ou mais horizontes (HOLE, 1961).

animais para dentro do perfil de solo, onde ocorre a decomposição (Gabet; Reichman; Seabloom, 2003; Ireson; Butler, 2009; Miklós, 2012; Coleman; Wall, 2014).

As formigas saúvas, insetos do Gênero *Atta*, destacam-se pela natureza de seu comportamento forrageiro, cortando e transportando folhas para dentro do saueiro (Mariconi, 1970; Della Lucia, 2011), o que as levou a serem conhecidas como “cortadeiras”. Segundo Wilson e Hölldobler (1978), as colônias destas formigas podem ser consideradas como superorganismos, por apresentarem um estágio avançado de organização e eussocialidade. A eussocialidade contribui com a minimização de conflitos reprodutivos e com o ordenamento da casta operária, a fim de maximizar a eficiência da colônia (Wilson; Hölldobler, 1978).

De acordo com Zmitrowicz (2001), os formigueiros são estruturas de uso flexível e em contínua construção. O sistema de “painelas” (ou câmaras) organizado pelas formigas é interconectado e permite a produção de alimentos, a reprodução, o descarte de resíduos e o transporte de terra solta escavada (Wilson; Hölldobler, 1978; Zmitrowicz, 2001; Forti *et al.* 2018). Conectando uma painela a outra estão os canais ou pedotúbulos. Estes pequenos corredores levam as formigas da profundidade até a superfície onde se formam os “olheiros”. Pelos olheiros, a matéria orgânica é transportada até as câmaras de cultivo, retira-se a terra solta removida dos canais e painelas, além de permitir a circulação de ar dentro do saueiro (Zmitrowicz, 2001).

As saúvas são micófagas e apresentam uma relação de simbiose obrigatória com o fungo que cultivam. Dentro de painelas específicas desenvolvem-se os “jardins de fungos”, locais onde este é cultivado por formigas jardineiras, mantendo condições ideais (pH 5) para sua proliferação (Wilson; Hölldobler, 1978). Todo cuidado despendido ao fungo é necessário para que este produza alimento para toda a colônia. As saúvas desenvolveram essa forma de “agricultura” há cerca de 60 milhões de anos atrás, tal atividade permitiu seu grande sucesso biológico, sendo consideradas os herbívoros dominantes nas Américas (Wilson; Hölldobler, 1978; Schneider, 2003; Borba, 2006; Autuori, 2010).

As formigas *Atta* costumam forragear plantas localizadas entre 50cm e 5m de distância dos olheiros, desta forma, menos energia é investida na

manutenção do formigueiro e da alimentação da colônia (Endringer, 2011). As cortadeiras podem ser consideradas generalistas, porém, algumas espécies apresentam uma preferência no corte de gramíneas e outras no corte de eudicotiledôneas (Della Lucia, 2011). Em estudo sobre o comportamento forrageiro de formigas da espécie *Atta robusta* (saúva-preta), Endringer (2011) constatou que estas saúvas cortam e transportam folhas de 32 taxa de plantas, tanto monocotiledôneas como eudicotiledônias. Em sua área de estudo, a autora identificou que estas formigas forrageiam preferencialmente folhas verdes, porém, também transportam folhas secas, cladódios, flores, frutos e sementes em menor frequência.

Conforme Borba *et al.* (2006), a preferência das saúvas por certos tipos de planta está ligada a compostos secundários e às exigências nutricionais do fungo que cultivam. Ribeiro e Marinho (2011), apontam que o forrageamento ocorre orientado por estímulos do meio, como o odor das plantas e seu teor de umidade, havendo registros na literatura que apontam para uma preferência por plantas de baixo teor de umidade. Ademais, as defesas físicas das folhas, sua idade e valor nutricional da seiva podem interferir na decisão de corte, o que favorece a seleção de plantas menos duras, de folhas mais jovens e com mais seiva (Ribeiro; Marinho, 2011)

As folhas são selecionadas e cortadas pelos indivíduos da colônia e transportadas para o interior do formigueiro, onde são guardadas em painéis específicas. O material selecionado é inspecionado e depois levado até a câmara do fungo, onde é esmagado, mastigado, acrescido a fezes para então ser incorporado ao fungo (Mariconi, 1970; Wilson; Hölldobler, 1978; Schneider, 2003; Borba, 2006; Autuori, 2010; Della Lucia, 2011).

As formigas cortadeiras vêm praticando esta cultura de subsistência há milhões de anos (Wilson; Hölldobler, 1978). As formigas agricultoras de fungos surgiram pouco após o evento de extinção em massa K–Pg entre 61 e 57 Ma. Condições ambientais adversas levaram as colônias a trazer os fungos para o interior do solo, onde encontram condições mais úmidas que permitem sua proliferação (Branstetter *et al.* 2017). Cultivando fungo e estocando alimento para este, as cortadeiras teriam alimento, garantido a evolução e dominância ecológica das *Atta*. Essa associação beneficia também a colônia de fungos, que evoluiu conjuntamente às formigas saúvas, em função destas permitirem e

estimulem seu desenvolvimento e reprodução. Segundo Wilson e Hölldobler (1978), as câmaras de fungo das cortadeiras frequentemente encontram-se nos 3 metros mais superficiais do solo pois estes oferecem as melhores condições microclimáticas para o crescimento do fungo.

Conforme Borba (2006), o fungo simbiote das formigas saúvas, *Leucoagaricus gongylophorus*, se desenvolve com a adição de amido e xilana, componentes presentes nas folhas forrageadas. As cortadeiras buscam manter as culturas de fungos em pH 5, ótimo para o desenvolvimento deste e demasiado ácido para o desenvolvimento de fungos e bactérias parasitas (Wilson; Hölldobler, 1978). Para tal, as *Atta* possuem glândulas metapleurais que secretam ácidos baixando o pH do material vegetal, geralmente neutro ou básico (Borba, 2006).

Conforme Miklós (2012), as saúvas são as que mais transportam solos verticalmente, dentro do perfil, podendo movimentar quantidades superiores a 40 toneladas de solos ao longo do desenvolvimento de uma colônia (Moreira *et al.*, 2004). Estas formigas podem reorganizar horizontes de solo espessos, produzir estruturas granulares pequenas ($\leq 0,6\text{cm}$), microagregados ($< 300\mu\text{m}$) e contribuir com a gênese de horizonte B latossólico, sendo promotoras da biogênese dos solos.

A translocação do fitólito no solo em decorrência da bioturbação é um fato reportado pela literatura científica. Por meio desta, constata-se que em virtude da bioturbação extrema, em um mesmo horizonte de solo podem existir dois reservatórios de fitólitos de diferente cronologia e composição. (Hart; Humphreys, 1997; Runge, 1999; Humphreys *et al.*, 2003; Farmer, 2005).

Estudos como os de Hart e Humphreys (2003; 2004), Humphreys *et al.* (2003), Gabet; Reichman; Seabloom (2003), Madella *et al.* (2012), Pearsall (2016), Rodrigues (2019) e Jouquet *et al.* (2020), buscaram entender o efeito da bioturbação na dinâmica dos fitólitos dos solos e suas implicações nas interpretações paleoambientais.

De acordo com Hart e Humphreys (2003; 2004), os fitólitos podem ser incorporados no solo a partir de partículas em material fecal, pelo movimento da água através dos poros e fendas do solo (pervecção), pela queda vertical (em fendas maiores) ou a partir do enterramento lento ou rápido. Segundo os autores, o padrão de distribuição dos fitólitos no solo também está condicionado

à textura do solo, que por sua vez, influencia na eficácia da bioturbação, da pervecção e do enterramento.

Em seus estudos, Madella e Lancelotti (2012) e Pearsall (2016) apontam a ocorrência de uma redução normal da quantidade de fitólitos em profundidade. Ainda, verificam a presença destas células silicosas em biotúbulos encontrados em horizontes B, preenchidos com materiais subjacentes, indicando a ação da macrofauna no transporte dos fitólitos no interior do solo.

Rodrigues (2018) identificou uma redução linear da bioturbação em profundidade em perfis de Latossolo na Depressão Periférica Paulista. Conforme a autora, a homogeneidade dos atributos dos perfis de solo estudados, bem como, a mistura de fitólitos preservados e corroídos são resultado da ação da macrofauna edáfica.

Sabe-se que a macrofauna tem papel fundamental na decomposição das plantas, e conseqüentemente, na deposição dos fitólitos no solo (Gabet; Reichman; Seabloom 2003). De acordo com Gabet; Reichman; Seabloom. (2003) e Jouquet *et al.* (2020), cupins e formigas são seletivos quanto às partículas que movimentam, indicando possível seleção de fitólitos por estes animais.

Jouquet *et al.* (2020), avaliaram a influência da atividade alimentar e de construção dos cupins na distribuição dos fitólitos em solos tropicais. De acordo com os autores, as térmitas usam camadas de solo mais argilosas, preferencialmente as camadas enriquecidas com argilominerais 2:1 (esmectitas). A preferência se dá em virtude da maior plasticidade e retenção de água das esmectitas. Também foi identificada a presença de fitólitos agregados nos cupinzeiros através da saliva dos cupins (Jouquet *et al.*, 2020).

Apesar do evidente impacto provocado pela macrofauna do solo nas paisagens, análises paleoambientais comumente não consideram sua influência sobre a sílica biogênica no perfil, podendo gerar interpretações equivocadas, sobretudo em regiões tropicais, onde a macrofauna edáfica é mais abundante e ativa.

2.3 Análise isotópica da matéria orgânica do solo ($\delta^{13}\text{C}$) e datação ^{14}C : técnicas complementares a análise de fitólitos no solo

Soma-se ao estudo fitolítico a análise das assinaturas isotópicas das plantas nos solos, identificadas por meio de análises dos isótopos de carbono $\delta^{13}\text{C}$, que permitem diferenciar os momentos em que no ambiente predominavam plantas de ciclos fotossintéticos distintos, ora C_3 , ora C_4 , de árvores e gramíneas, respectivamente (Vogel, 1993; Pessenda *et al.*, 2005). Segundo Piperno (2006), a combinação do estudo fitolítico com a análise dos isótopos de carbono torna a pesquisa paleoambiental muito mais efetiva pelo caráter complementar destas técnicas.

É possível discriminar os isótopos ^{13}C porque, em função do fracionamento isotópico, a relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dos tecidos vegetais é significativamente menor do que a da atmosfera (Vogel, 1993). Ademais, a composição dos isótopos de carbono é distinta nas plantas devido aos diferentes processos fotossintéticos que operam. Espécies de ciclo fotossintético C_3 são predominantes na maioria dos ecossistemas terrestres florestados, enquanto plantas do tipo C_4 são principalmente gramíneas, dominantes em ecossistemas com menor disponibilidade de água (Pessenda, *et al.*, 2005).

É possível identificar a quantidade de $\delta^{13}\text{C}$ em amostras de matéria orgânica vegetal dos solos e assim determinar o ciclo fotossintético da planta correspondente. Os ciclos C_3 expressam valores $\delta^{13}\text{C}$ mais negativos (-32 a -22‰) em comparação aos ciclos C_4 , ($\delta^{13}\text{C}$ -9 a -17‰) (Pessenda *et al.*, 2005). Desta forma, a análise isotópica fornece dados acerca da presença de plantas C_3 e/ou C_4 nos ambientes permitindo inferir as condições paleoclimáticas, especialmente de umidade, sob as quais estas plantas se desenvolveram.

A datação através do radionuclídeo ^{14}C é um método para aferição cronológica de *proxies* ambientais compostos de matéria orgânica. O ^{14}C é formado na estratosfera e resulta da interação entre os átomos de ^{14}N da atmosfera e os nêutrons secundários provenientes dos raios cósmicos que atingem a Terra naturalmente (Pessenda *et al.*, 2005). Os átomos de ^{14}C e demais isótopos de carbono são incorporados ao CO_2 atmosférico sendo continuamente assimilados pelos seres vivos até o fim de suas vidas, quando

o *input* do radionuclídeo cessa e se inicia o decaimento radioativo (Scheel-Ybert, 1999).

Esta técnica permite determinar cronologias de até cerca de 60.000 anos antes do presente (A.P), sendo o “presente” o ano de 1950 (devido ao acúmulo e concentração artificial de ^{14}C causado por testes e ataques nucleares feitos na década anterior) (Pessenda *et al*, 2005).

Aferindo a cronologia das mudanças ambientais compreende-se melhor o efeito delas na estrutura e desenvolvimento das fitofisionomias atuais. Também se pode relacionar as idades com padrões e/ou eventos climáticos pretéritos, que podem ter dado origem a mudanças ambientais.

Estudos como os de Bigarella (1971), Steveaux (1994; 2000); Pessenda *et al.* (1996 e 1998); Gouveia *et al.* (1997 e 1999); Martinelli *et al.* (1996); Moffato *et al.* (2005); Calegari (2008; 2017); Fernandes (2008); Parolin, Rasbold; Pessenda (2011); Santos (2013); Felipe *et al.* (2016); Kammer (2018); Chiapini (2021), Fonseca (2023) e Santos (2023) são alguns exemplos da utilização da análise de $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo e datações ^{14}C para inferir mudanças da vegetação ao longo do Quaternário no Brasil.

2.4. Micromorfologia

A micromorfologia do solo, ou micropedologia, proporciona uma visão detalhada acerca da gênese e dos processos que ocorrem nos solos em escala microscópica (Castro *et al.* 2003). Essa técnica analítica é realizada a partir da coleta criteriosa de amostras do solo, que são posteriormente impregnadas com resina, cortadas em lâminas delgadas e analisadas sob microscópios ópticos polarizadores ou em microscópios eletrônicos (Castro *et al.* 2003; Cooper *et al.* 2017). A análise das propriedades ópticas e químicas permite a identificação dos constituintes do solo e dos processos químicos, físicos e biológicos instalados nele ocorrendo em diferentes escalas de tempo. Junto das outras técnicas supracitadas, auxilia no entendimento holístico dos processos pedológicos e sua evolução no tempo e no espaço (Cooper *et al.* 2017).

Para a descrição e quantificação dos arranjos dos constituintes e feições das lâminas delgadas requer-se uma boa preservação da estrutura e a orientação original do material amostrado. No entanto, há limitações impostas

pela análise bidimensional de seções polidas na avaliação de porosidades e a restrição de resolução para avaliação de constituintes de dimensões cristalinas finas (Castro, *et al.*, 2003).

A porosidade, característica essencial do solo, é definida pela disposição e frequência dos poros na matriz do solo. Esse conceito refere-se à proporção do espaço ocupado pelos poros em relação ao volume total de solo, sendo a porosidade um atributo quantificável essencial para entender as funções hidrológicas e biológicas do solo, uma vez que esse atributo influencia profundamente a capacidade do solo de reter e conduzir água e ar – cruciais para sustentar a vida das plantas e os ecossistemas microbianos (Gardner *et al.*, 1999; Passoni *et al.* 2014).

A porosidade é produto da gênese e da estabilidade da estrutura do solo. O agrupamento de partículas primárias do solo constitui agregados que determinam condições de macro e microporosidade (Cooper *et al.* 2005a; 2010). Entre os agregados existem espaços porosos que variam em tamanho, formato e grau de conectividade, características que influenciam diretamente nas funções do solo como drenagem e disponibilidade de umidade (Passoni *et al.* 2014; Cooper *et al.* 2016). A distribuição e o tamanho dos poros não são uniformes, mas, definidos conforme a textura, estrutura e processos físicos e biológicos que ocorrem no sistema trifásico do solo.

Classificar e quantificar a porosidade de um solo permite estabelecer técnicas eficazes de manejo e conservação, além de possibilitar o entendimento da dinâmica biológica dentro do solo. A micromorfologia de solos e de sedimentos oferece uma perspectiva única para o estudo dos fitólitos, pois as amostras tratadas preservam o contexto original, permitindo uma compreensão mais profunda dos processos de deposição e preservação dessas células (Matthews, 2010; Shilito; Ryan, 2013; Devos; Vrydaghs, 2023).

A observação de fitólitos em análises micromorfológicas tem sido documentada em diferentes tipos de solos e sedimentos (Macphail; McAvoy, 2008; Matthews, 2010; Shilito; Ryan, 2013; Devos *et al.* 2013; Vrydaghs, *et al.* 2017; Macphail; Goldberg, 2018; Devos; Vrydaghs, 2023). A partir de lâminas delgadas é possível averiguar a presença de fitólitos como células simples, sistemas articulados, em tecidos vegetais em diferentes estágios de decomposição, em coprólitos e em materiais arqueológicos. Em alguns

contextos, este material pode ser a única evidência remanescente de coberturas vegetais pretéritas ou em contextos arqueológicos (Devos; Vrydaghs, 2023).

No entanto, a identificação de fitólitos em lâminas delgada é dificultada por alguns fatores. A natureza aleatória e fragmentária dos restos de plantas frequentemente encontrados nessas amostras dificulta o reconhecimento dos morfotipos (Matthews, 2010). Os fitólitos frequentemente ocorrem parcialmente mascarados pelos materiais minerais das amostras, dificultando a observação, sobretudo, de células simples. Outra limitação é dada pela espessura das lâminas (20 - 30 μ m), prejudicando a visibilidade de células pequenas (Devos; Vrydaghs, 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área do Estudo

A área de estudo localiza-se na região Oeste do Paraná, distrito de Porto Mendes, no município de Marechal Cândido Rondon, na margem esquerda do Reservatório da Hidrelétrica de Itaipú (Figura 1), no Terceiro Planalto Paranaense. Geograficamente os perfis estão localizados nas coordenadas -24.826676 S e -53.990646 W, em torno de 240m de altitude. A área é administrada pela Associação Técnica das Indústrias de Mandioca do Paraná (ATIMOP). Desde a implantação da Hidroelétrica de Itaipú, o local tornou-se parte de uma área de proteção que foi reflorestada com espécies nativas há cerca de vinte anos atrás. O local de abertura das trincheiras situa-se na margem do fragmento de mata plantada, no limite da área de cultivo de mandioca, onde existia um formigueiro de grande porte.

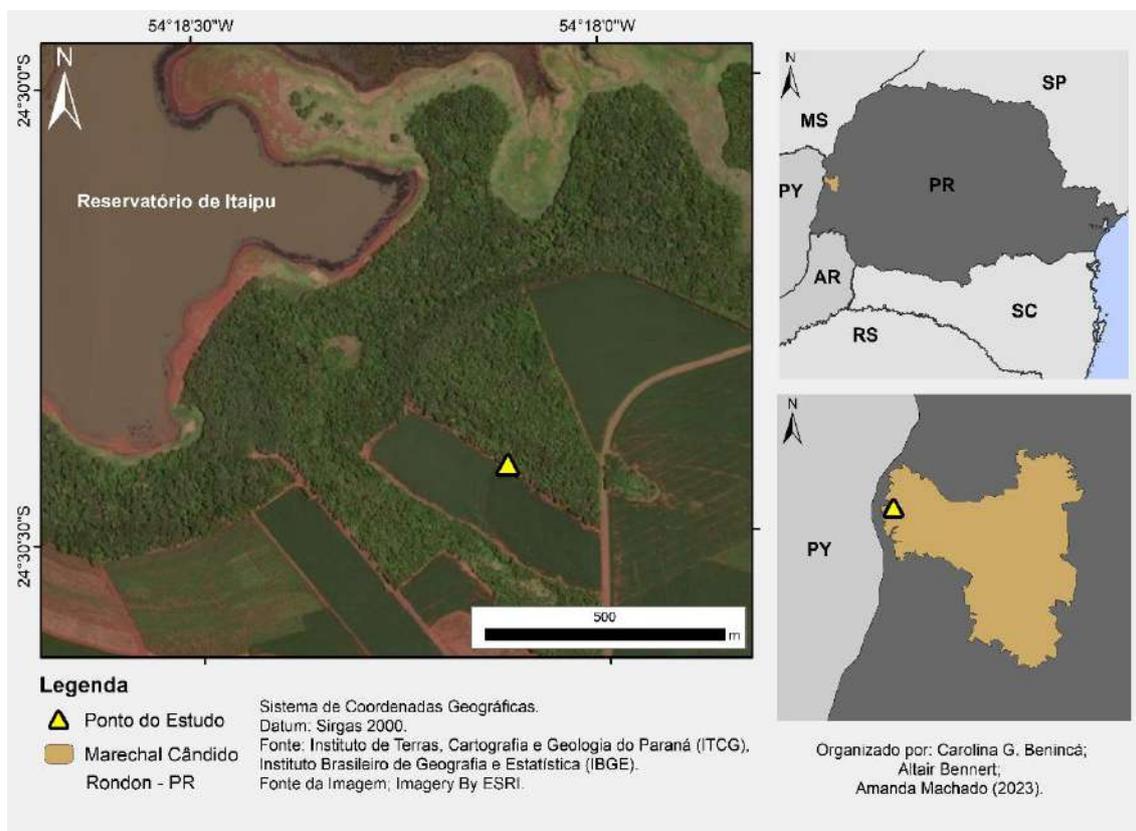


Figura 1: Área do Estudo. Fonte: Autora.

Regionalmente, a geologia é caracterizada pelos basaltos do grupo Serra Geral (Arioli; Licht, 2013). Localmente, predominam os basaltos da Formação Cascavel, Membro Toledo (Arioli; Licht, 2013; Licht; Arioli, 2018). Esse membro é composto essencialmente por derrames tabulares de basalto arroxeadado, maciço (fanerítico fino a afanítico), com rochas vulcanoclásticas subordinadas (Arioli; Licht, 2013). Essa estrutura geológica sustenta um relevo de dissecação média-baixa, composto por topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V”, no limite entre os Planaltos de São Francisco e de Foz do Iguaçu (Oka-Fiori; Santos, 2008). A altitude nesses planaltos varia entre 120 e 700m.

Os solos da área são predominantemente argilosos, profundos e bem desenvolvidos pedogeneticamente. Regionalmente nos topos e nos setores mais planos das vertentes predominam os Latossolos Vermelhos distroféricos, na média-baixa vertente e setores mais dissecados predominam os Nitossolos Vermelhos distroféricos e em algumas situações ocorrem associações entre Nitossolos e Cambissolos (Embrapa, 1984; Bheling; Santos, 2008).

O clima da região na qual a área se insere é o subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com chuvas concentradas no verão e raras geadas no inverno (classificação de Köppen, 1936). As temperaturas são superiores à 22°C no verão e inferiores à 18°C no inverno, com precipitação média anual entre 1250 e 1500mm (Nitsche *et al.* 2019). A vegetação original que recobria a região era a Floresta Estacional Semidecidual, presente hoje em fragmentos remanescentes (Maack, 1981; Roderjan, 2002). De acordo com Roderjan (2002), as formações vegetais dessa unidade têm como principal característica fisionômica a semidecidualidade, no período do inverno, que é o mais seco do ano. Esse fenômeno é praticamente restrito aos estratos superiores e parece ter correlação principalmente com os parâmetros climáticos, quer históricos ou atuais.

O uso da terra na região é voltado para agricultura mecanizada (monoculturas de grãos), com práticas de manejo que adotam plantio direto, curvas de níveis e sucessão de cultivos. A área da ATIMOP é dedicada ao cultivo de mandioca e de grãos. Embora haja práticas de manejo as formigas cortadeiras têm sido uma constante na região, desenvolvendo seus ninhos

tanto em áreas de mata quanto em áreas agrícolas, o que tem despertado a atenção do poder público para o controle da infestação desses insetos.

Na área do estudo, ocorrem esses formigueiros, tendo sido um deles selecionado para esse estudo por apresentar acúmulo de terra em superfície e demais estruturas que demonstravam atividade no formigueiro, atendendo aos objetivos dessa pesquisa.

3.2 Trabalho de campo e coleta

O trabalho de campo seguiu os procedimentos de descrição e amostragem de solos descritos em Santos *et al.* (2015).

Foram amostrados dois perfis de solo profundos, típicos da região Oeste do Paraná, distantes cerca de 5 metros, situados no terço inferior da vertente. No perfil P1 verifica-se feições que expressam atividade biológica comum, este perfil foi amostrado como referência para fins de comparação da ação das formigas cortadeiras saúva (gênero *Atta sexdens rubropilosa*) no solo (Figura 2). O perfil P2, sob o formigueiro, apresenta forte expressão, atuação e feições macromorfológicas de atividades da colônia de formigas (galerias, painéis, canais preenchidos etc.). Foram coletadas:

- Amostras deformadas por horizonte pedogenético, para análises físico-químicas de rotina no P1;
- Amostras deformadas, coletadas sistematicamente da base até o topo de ambos os perfis de solo, a cada 10cm para extração e análise de fitólitos e análise isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$;
- Amostras deformadas das painéis e canais do formigueiro para análises de físico-químicas de rotina, análise de fitólitos e isótopos.
- Amostras deformadas, por horizonte em ambos os perfis, para determinação da quantidade de carvão por quilograma de solo (g.kg^{-1});
- Amostras indeformadas, coletadas por horizonte pedológico em anéis volumétricos (em triplicata), para determinação da densidade do solo, no P2;
- Amostras indeformadas, coletadas por horizonte pedológico em ambos os perfis, para análise micromorfológica.

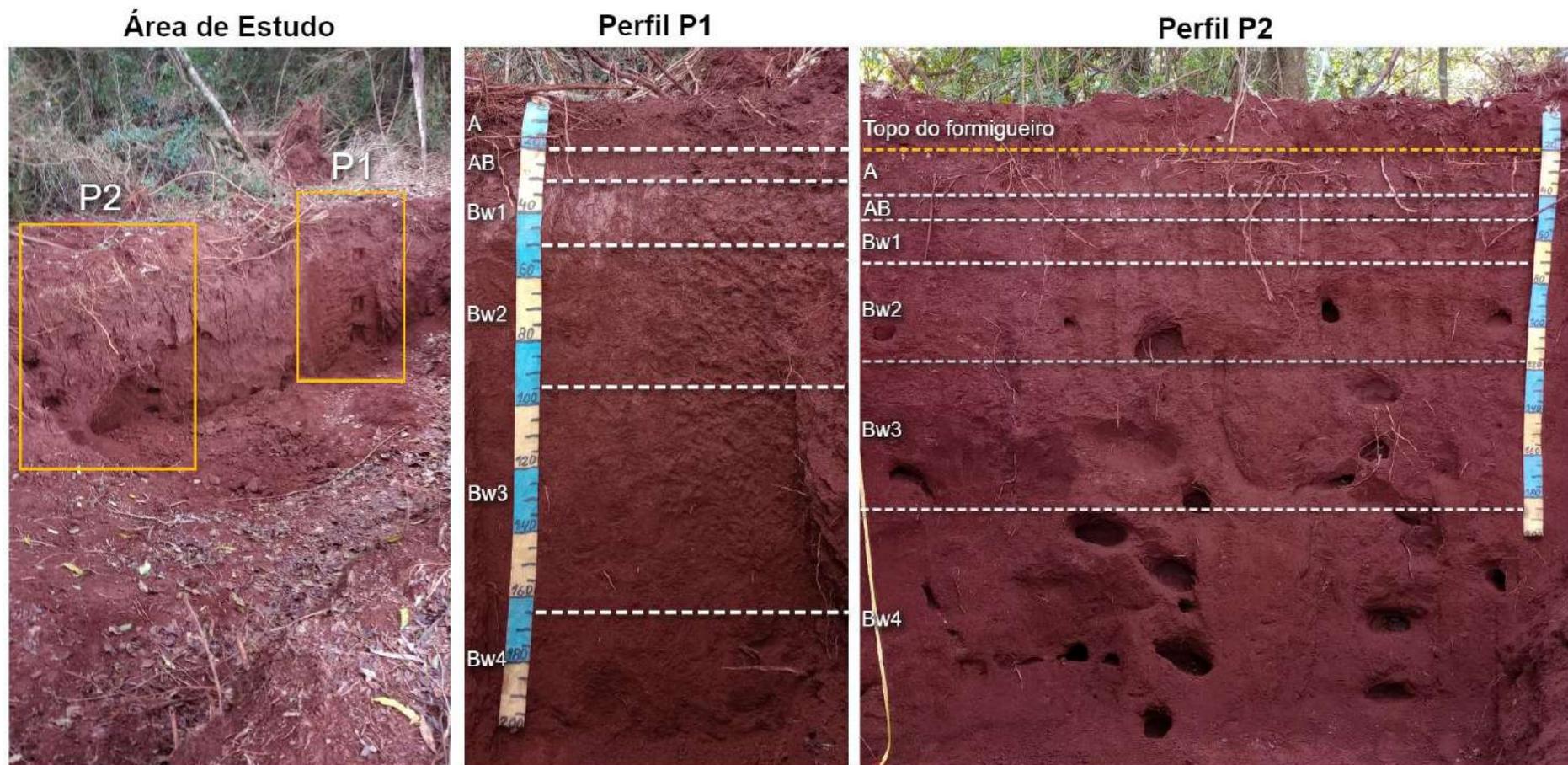


Figura 2: Disposição dos perfis de solo estudados.

Perfil 1 – sem expressão de feições macromorfológicas de atividade das formigas cortadeiras; Perfil 2 – com forte expressão macromorfológica (painéis, câmaras e galerias) da atividade das saúvas. Fonte: Autora.

3.3 Análises laboratoriais

Para fins de caracterização e classificação do solo segundo o SiBCS (Santos *et al.*, 2018), as análises físicas e químicas de rotina foram realizadas nas amostras dos horizontes pedogenéticos somente do P1 devido à proximidade e semelhança dos perfis.

As análises físico-químicas dos solos foram realizadas no Laboratório de Fertilidade e Nutrição Mineral de Plantas e Laboratório Multiusuário de Estudos da Dinâmica Ambiental (LEDA) da Unioeste *campus* Marechal C. Rondon e nos Laboratórios de Física do Solo e de Nutrição de Plantas da ESALQ/ USP.

3.3.1 Análises físicas de rotina

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo Método do Densímetro de Bouyoucos (Teixeira *et al.*, 2017). Foram utilizados 50g de solo e dispersante (solução de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio) para a determinação das seguintes classes de diâmetros (mm de partículas) conforme USDA: Areia total (AT) = 2 a 0,05; silte = 0,05 a 0,002; argila total < 0,002. Areia – pesagem.

A análise de densidade do solo (D_s) foi realizada pelo método do anel volumétrico (em triplicata) descrito em Teixeira *et al.* (2017). Conhecendo-se o volume do cilindro e a massa de solo, a densidade foi calculada considerando a Equação (1):

$$D_s = \frac{m_a}{V} \quad (1)$$

Em que D_s é a densidade do solo em kgdm^{-3} ; m_a é a massa de solo seco a 105°C até peso constante, em gramas; e V é o volume do cilindro em cm^3 .

A densidade de partículas foi determinada pelo do método do balão volumétrico (Teixeira *et al.* 2017). Em um balão volumétrico de 50ml foram adicionados 20g de TFSA e 30ml de álcool etílico PA (%) e agitado suavemente. Após repouso de 30 minutos, o balão volumétrico foi completado com álcool etílico anotado para cálculos posteriores.

A porosidade total (PT) foi calculada a partir da relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade de partículas (D_p), através da Equação 2:

$$PT = 1 - D_s/D_p \quad (2)$$

3. 3. 2 Análises Químicas de Rotina

Para fins de caracterização e classificação do solo segundo o SiBCS (Santos *et al.*, 2018), as análises químicas de rotina foram realizadas nas amostras dos horizontes pedogenéticos do P1.

O pH foi determinado conforme Lana *et al.* (2016). Foram acrescentadas soluções de água destilada e cloreto de potássio ($KCl\ 1\ mol\ L^{-1}$) a amostras TFSA (razão solo: solução de 1: 2,5) e agitadas por 15 minutos a 240 rpm. Após, o pH foi aferido através de um potenciômetro, ou, pHmetro. A capacidade de troca de cátions (CTC) (em $cmol_c\ kg^{-1}$) foi calculada por meio da soma de cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} extraídos com solução de $KCl\ 1\ Mol\ L^{-1}$, de K^+ e Na^+ extraídos com solução de $HCl\ 0,05\ Mol\ L^{-1}$, e de H^+ e Al^{3+} , extraídos com solução tampão de acetato de cálcio pH 7,0. A partir desses valores também foram calculados: a CTC efetiva (em $cmol_c\ kg^{-1}$) e a saturação por bases (Valor V, %).

A Matéria Orgânica do Solo (MOS) foi determinada a partir do Método Walk Black (Lana *et al.*, 2016). O método consiste na oxidação da matéria orgânica do solo em uma solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7\ 0,167\ mol/litro^{-1}$) e posterior titulação com solução de $FeSO_4\ (1\ mol/ l^{-1})$.

Os conteúdos de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO e TiO_2 foram determinados conforme Teixeira *et al.* (2017). A análise foi realizada em 1 g de TFSA de três amostras do P1 (A, Bw2 e Bw4) que foi digerido com 20 mL de $H_2SO_4\ (1:1)$. Essa análise foi realizada no Laboratório de Nutrição de Plantas da ESALQ/ USP.

3. 3. 3. Índices Geoquímicos

As concentrações dos óxidos foram utilizadas para o Índice de Dessilicação - DSI (Equação 3) (Jien *et al.*, 2016; Lima *et al.*, 2021), o Índice Sílica-Titânia – STI (Equação 4) (Jayawaderna; Izawa, 1994; Price; Velbel, 2003) e para o cálculo da razão molecular K_i (Equação 5) (Resende; Santana, 1988):

Índices de Dessilicação – DSI – avalia os teores de sílica em relação a elementos menos móveis como ferro e o alumínio (Equação 3):

$$DSI = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3 + Al_2O_3} \quad (3)$$

Valores próximos a zero indicam alto grau de dessilicação; solos com desenvolvimento pedogenético avançado tendem a apresentar valores decrescentes da base ao topo (Price; Velbel, 2003; Ruxton, 1968):

Índice Sílica-Titânia - STI - Indica o grau de intemperismo químico principalmente em solos de regiões tropicais (Equação 4):

$$STI = 100 * \frac{(SiO_2/TiO_2)}{(SiO_2/TiO_2)+(SiO_2/Al_2O_3)+(Al_2O_3/TiO_2)} \quad (4)$$

Valores próximos a zero indicam materiais altamente intemperizados e acima de 90 assinalam rocha fresca (Jayawaderna; Izawa, 1994; Price; Velbel, 2003).

Índice intemperismo do solo – Ki (Equação 5)

$$Ki = \left(\frac{SiO_2}{Al_2O_3} \right) * 1,7 \quad (5)$$

Esses índices são importantes para indicar o grau de maturidade e desenvolvimento pedogenético dos solos e eventuais interferências – como aporte e remobilização de material – na bioturbação e na distribuição dos elementos no perfil.

3.4 Micromorfologia

3.4.1 Descrição micromorfológica

Esta etapa consiste na observação morfológica em escala micrométrica, conduzida a partir de amostras indeformadas, coletadas conforme horizonte de solo e de acordo com feições macromorfológicas de interesse (expressão da atividade das formigas), em caixas com 12x7 cm (Tabela 2).

Foram coletadas oito amostras, sendo quatro do P1 para estudo da organização natural do solo representativo da área (horizontes AB, Bw1, Bw3 e transição Bw3/Bw4) e quatro do P2, selecionadas por apresentarem expressão de macrofeições decorrentes da ação das formigas no perfil (horizontes Bw1, Bw2, transição Bw1/Bw2 e Bw4/ panela de resíduos).

Tabela 1: Relação de amostras coletadas para análise micromorfológica.

Amostra	Horizonte	Amostra	Horizonte/feição
P1 15-27cm	AB	P2 46-58cm	Bw1/Bw2
P1 42 - 54cm	AB/ Bw1	P2 105-117cm	Bw2
P1 110-122cm	Bw2	P2 97-109cm	Bw2
P1 150-162cm	Bw3/Bw4	P2 213-223cm	Bw4/ panela de resíduos

Fonte: Autora.

As oito amostras foram enviadas ao Laboratório de Micromorfologia do Solo (LabMicro) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” – ESALQ/USP, onde foram secas e impregnadas com uma solução de resina de poliéster e monômero de estireno (Moraes *et al.*, 2015; Castro *et al.*, 2019). Após a secagem da resina, foi feito o corte e polimento dos blocos e confecção das lâminas delgadas para descrição e obtenção das informações micromorfológicas, conforme critérios propostos por Stoops *et al.* (2003 e 2010).

3.4.2 Quantificação da porosidade em blocos polidos

Esta etapa foi conduzida no Laboratório de Microscopia da ESALQ/ USP seguindo a metodologia descrita em Cooper *et al.* (2016) a partir da obtenção de imagens 2D dos blocos polidos. A análise da porosidade estima a área de total de poros que recobre determinada seção do bloco polido representada em uma imagem digitalizada. O resultado é função da relação entre o número de *pixels* ocupado pelos poros e o número total de *pixels* de uma imagem binarizada.

Em cada bloco polido foram selecionados entre 10 e 12 campos representativos (em função do tamanho da amostra) – áreas homogêneas, transições e feições de interesse. Estes campos foram fotografados a partir de uma lupa estereoscópica com aumento de 10x e sob luz UV para ressaltar as qualidades dos poros da amostra.

As imagens foram posteriormente calibradas e processadas a partir do *software* SPIA organizado por Cooper *et al.* (2016) no programa VisiLogic™ que discrimina todos os poros da amostra de solo e classifica-os segundo classes de

tamanho, forma e área definidos por Cooper *et al.* (2010) em arredondados, alongados e complexos permitindo assim uma análise global da porosidade (Tabela 2).

Tabela 2: Classificação dos poros conforme tamanho e forma – SPIA.

Tamanho	Área (pixels)	Área (mm ²)	Classe de tamanho e forma		
Pequeno (p)	1 a 100	0,000156 – 0,0156	Arr _p ¹	Alo _p ²	Comp _p ²
Médio (m)	100 a 1000	0,0156 -0,156	Arr _m	Alo _m	Comp _m
Grande (g)	> 1000	>0,156	Arr _g	Alo _g	Comp _g

¹Arredondado; ²Alongado; ³Complexo.

Fonte: Adaptado de Cooper *et al.* 2016.

3.5 Análise Isotópica

A análise isotópica visa conhecer a composição isotópica da matéria orgânica do solo, representando aspectos da vegetação local presente e pretérita (Pessenda, 2005). As plantas discriminam negativamente o ¹³CO₂ durante a fotossíntese como resultado de propriedades bioquímicas das enzimas fixadoras de carbono e de limitações para a difusão do CO₂ na folha (Farquhar *et al.*, 1989).

As amostras de solo coletadas sistematicamente a cada 10 cm, da base até o topo de cada perfil, foram secas ao ar, maceradas, peneiradas (malha de 0,53 mm), pesadas e posteriormente encaminhadas ao Laboratório de Isótopos Estáveis, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP – Campus Luiz de Queiroz (Piracicaba – SP). Neste, foi realizada a determinação de δ¹³C em um analisador elementar (*CarloErba - CHN 1110*) acoplado ao *Thermo Fisher Scientific Mass Spectrometer (FinniganDelta Plus)*.

Os resultados de COT foram expressos em gramas por quilograma (g. kg⁻¹) de peso seco e os da composição isotópica são apresentados em unidade de δ(‰), determinada em relação ao padrão internacional PDB (*Pee Dee Belemnite*), com precisão de ± 0,2‰ (Equação 6).

$$\delta^{13}\text{C} = ((R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}) / R_{\text{padrão}}) * 1000 \quad (6)$$

Onde: $R_{amostra}$ e $R_{padrão}$ referem-se à relação $^{13}C/^{12}C$ da amostra e do padrão, respectivamente.

3.6 Datações ^{14}C da MOS

A primeira etapa da datação ^{14}C da MOS consiste na extração da fração humina do solo, conforme metodologia descrita em Jou *et al.* (2021), que foi realizado no Laboratório Multidisciplinar de Estudos da Dinâmica Ambiental (LEDA, Unioeste *campus* Marechal C. Rondon). Para tal, foram selecionadas amostras de solo correspondentes a camadas de 10cm de espessura de diferentes seções do perfil de solo em triplicata (Quadro 1).

Tabela 3: Relação de amostras enviadas para datação.

Perfil	Amostra
P1	50 – 60cm
P2	60 – 70cm
P2	100 – 110cm
P2	240 – 250cm

Fonte: Autora.

As amostras foram selecionadas a partir dos resultados da análise dos dados isotópicos, visando conhecer as idades de seções específicas do perfil, que apontavam mudanças da vegetação em diferentes graus.

Inicialmente as amostras foram pré-tratadas fisicamente para remoção de fragmentos vegetais, raízes, carvão e insetos (dentre outros materiais orgânicos de idades recentes). Em seguida, o material passa por uma etapa de flotação em HCl 0,1 mol/L⁻¹ para remoção de demais fragmentos orgânicos. Na sequência, as amostras foram tratadas em placa aquecedora acerca de 90°C em uma solução de HCl a 4% por 4h. A extração foi repetida até que foram eliminados todos os ácidos húmicos.

Após, as amostras foram secas em estufa e enviadas ao Laboratório C14 do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP. No CENA foram

confeccionados os grafites para análise via AMS realizada no Laboratório AMS da Universidade da Geórgia (UGAMS), Estados Unidos da América.

Ao final, as idades ^{14}C são expressas em anos AP (antes do presente), normalizadas a $-25,0\text{‰}$ (padrão PDB), sendo o presente o ano de 1950 e calibradas em anos de calendário pelo Beta Cal 3.21, método SHCAL 13 (Ramsey, 2009; Hogg *et al.*, 2013). Os valores de ^{14}C foram calibrados (2σ) e são expressos em anos antes do presente – AP ou BP (*before present*).

Utilizou-se um modelo bayesiano de idade – profundidade para interpolação das idades datadas e definição de idades medianas prováveis (anos cal. AP.) para as demais profundidades dos perfis. O modelo foi construído usando o pacote *Bacon for R* (Blaauw; Christen, 2011), a curva de calibração SHCal20 (Hogg *et al.*, 2020) e a curva SH Zone 1-2 pós-bomba (Hua *et al.*, 2022).

3.7 Análise Fitolítica

As etapas de extração e identificação das assembleias de fitólitos foram conduzidas no Laboratório Multiusuário de Estudos da Dinâmica Ambiental – LEDA (Unioeste *campus* Marechal Cândido Rondon), a fim de conhecer e comparar a composição das assembleias fitolíticas.

3.7.1 Extração de fitólitos do solo e serrapilheira

Para a extração dos fitólitos preservados em solo, seguiram os procedimentos descritos por Calegari *et al.* (2013a) (método 2), para eliminação da matéria orgânica do solo, dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e da argila. Os fitólitos da serrapilheira foram extraídos conforme procedimentos modificados de Campos e Labouriau (1966) e Piperno (2006). A serrapilheira foi lavada em lavadora ultrassônica por 15min para remoção de partículas de solo e secados em estufa por uma noite (8h/100°C). O material foi pesado e calcinado em mufla (6h/600°C) para remoção dos compostos orgânicos. Após o resfriamento, o material foi tratado com HCl (7%) em placa aquecedora (15min/75°C) para remoção dos carbonatos. O material remanescente foi lavado com água destilada e centrifugado três vezes (5min/1500rpm),

Em seguida, os fitólitos foram separados por flutuação utilizando uma solução de politungstato de sódio com densidade de $2,35 \text{ g.cm}^{-3}$, conforme Madella *et al.* (2005). O material recuperado (resíduo remanescente - RR) foi seco em estufa e pesado para obtenção da fração insolúvel ao ácido (FIA).

Após a extração, uma alíquota conhecida do RR de cada amostra foi utilizada para preparação de lâminas temporárias (preparadas com óleo de imersão e vedadas com esmalte) e permanentes (preparadas com ®Enterlan), para posterior identificação e contagem dos fitólitos em microscópio.

3.7.2 Identificação, contagem e classificação das assembleias de fitólitos

Em microscópio petrográfico com magnificação de 400x (objetiva de 40x), foram contados no mínimo 200 morfotipos de fitólitos com significado taxonômico em cada lâmina produzida com as amostras do solo. Os fitólitos foram descritos e nomeados conforme o *International Code for Phytolith Nomenclature – ICPN 2.0* (ICPT *et al.*, 2019), e agrupados de acordo com o significado taxonômico de cada grupo baseado em autores como Mulholland (1989), Twiss (1992), Alexandre *et al.* (1997; 1999), Runge (1999), e nas coleções de referência das principais fitofisionomias brasileiras, disponível no LEDA (Calegari, *et al.*, 2014; Calegari, *et al.*, 2017; Cecchet, 2012; Felipe, 2012; Raitz, 2012; Souza, 2019; Mozer, 2021).

A investigação das assembleias fitolíticas contemplou aspectos taxonômicos e tafonômicos a fim de obter informações que possam contribuir para o entendimento do tempo de permanência de fitólitos no solo e possíveis impactos da atividade de formigas sobre estas células silicosas e seu padrão de deposição.

Para investigar a trajetória evolutiva da vegetação e possíveis mudanças climáticas na área de estudo, foram calculados os seguintes índices fitolíticos:

Índice de Adaptação a Aridez (Iph) que aporta informações sobre disponibilidade hídrica (umidade) no ambiente, baseado na relação entre fitólitos de gramíneas C₄ das subfamílias Chloridoideae e Panicoideae (Diester-Hass *et al.*, 1973) (Equação 7). Quanto maior o valor do índice, mais áridas serão as condições ambientais.

$$I_{ph} = \frac{SADDLE}{SADDLE+CROSS+BILOBATE+POLYLOBATE} * 100 \quad (7)$$

Índice Climático (Ic) que marca as variações de temperatura a partir da razão entre fitólitos de gramíneas Pooideae e a somatória daqueles de Pooideae, Chloridoideae e Panicoideae (Twiss, 1992) (Equação 8). Altos valores indicam o predomínio de gramíneas Pooideae (C₃) e, portanto, de temperaturas mais baixas.

$$Ic = \left(\frac{RONDEL+TRAPEZIFORM POLYLOBATE+TRAPEZIFORM}{RONDEL+TRAPEZIFORM POLYLOBATE+TRAPEZIFORM+ SADDLE+CROSS+BILOBATE} \right) \quad (8)$$

Índice de Cobertura Arbórea (D/P) é relativo à densidade da cobertura arbórea, calculado por meio da relação entre fitólitos de Eudicotiledoneae lenhosas e da soma dos fitólitos de Poaceae, permitindo distinguir ambientes como florestas, savanas/cerrados e campos (Alexandre *et al.*, 1997; Bremond *et al.* 2005) (Equação 9).

$$\frac{D}{P} = \frac{SPHEROID PSILATE+SPHEROID ORNATE}{RONDEL+TRAPEZIFORM+POLYLOBATE+SADDLE+CROSS+BILOBATE} \quad (9)$$

Índice de Stress Hídrico (Fs), calculado a partir da porcentagem relativa de morfotipos buliformes em relação as células curtas de Poaceae – GSSCP (Bremond *et al.* 2005) (Equação 10). Valores mais altos indicam a ocorrência de períodos mais secos.

$$Fs = \frac{BULLIFORM FLABELLATE}{SADDLE+CROSS+BILOBATE+TRAPEZIFORM+TRAPEZIFORM POLYLOBATE} \quad (10)$$

Índice de tafonomização, elaborado por Marcolin (2022), que traça a proporção de fitólitos tafonomizados no perfil de solo (Equação 11). Quanto mais alto, maiores as taxas de tafonomização de fitólitos nos solos.

$$I_{taf} = \frac{\text{Fitólitos identificados tafonomizados}}{\text{Fitólitos identificados não tafonomizados}} \quad (11)$$

3.7.3 Contagem fitólitos/ grama de solo:

A fim de discriminar zonas de maior ou menor concentração de fitólitos dentro dos perfis e possíveis interferências da atividade das formigas no perfil fitolítico do solo, foi realizada a contagem de fitólitos x não fitólitos em cada amostra. Esta análise consiste na quantificação do número absoluto de fitólitos, ou fragmentos destes, sem considerar a classificação dos morfotipos. Além disso foram contadas todas as demais partículas que restaram do processo de extração de fitólitos, incluindo minerais, óxidos e microcarvões.

A contagem é realizada ao longo de uma linha na lâmina (22 campos do microscópio), atravessando transversalmente a lâmina de microscopia, (Figura 3), classificando as partículas em: fitólito, não fitólito e carvão, adaptado de Calegari (20013b).

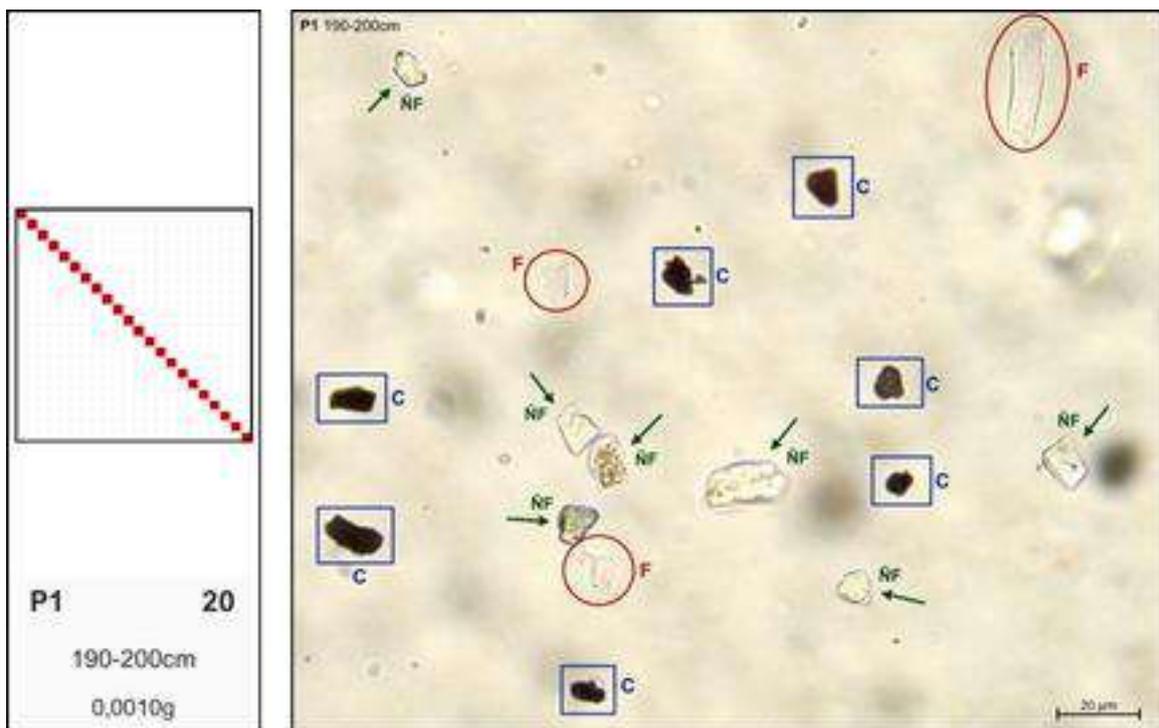


Figura 3: Contagem Fitólito X Não Fitólito. F: Fitólito; ÑF: Não Fitólito; C: Carvão. Fonte: Autora.

A partir desta contagem foi possível determinar um valor aproximado de fitólitos no material resultante da extração – a fração insolúvel ao ácido (FIA) – e portanto, estimar a quantidade destes microrrestos por grama de solo.

A determinação da quantidade de fitólitos por grama de solo foi adaptada de Calegari *et al.* (2013b) por meio de cálculos, utilizando o resíduo remanescente (RR) do processo de extração.

O número de fitólitos foi contado ao longo de três linhas em cada lâmina, em microscópio petrográfico Zeiss® sob magnificação de 400x. O número de fitólitos por grama de solo (PNW_{solo})² foi calculado utilizando a seguinte equação (5):

$$PNW_{soil} = \left[\left(\frac{NP*484}{22} \right) / WS_{RR} \right] * (WT_{RR} / W_{Soil}) \quad (5)$$

Sendo: PNW o número total de fitólitos contado em 22 campos; 484 uma constante que representa o número de campos em uma lâmina (pode variar de acordo com a magnificação e o microscópio utilizado); 22 uma constante que corresponde ao número de linhas na lâmina (pode variar de acordo com a magnificação e o microscópio utilizado); WS_{RR} o peso do resíduo remanescente (RR) usado para confecção de cada lâmina (em gramas); WT_{RR} o peso total de resíduo remanescente (RR) recuperado no final da extração (em gramas) e W_{Soil} o peso inicial de solo usado para extração dos fitólitos.

3.8 Análise estatística

A contagem absoluta de fitólitos foi organizada em matrizes que foram submetidas a análise multivariada (*cluster*) para identificação de agrupamentos e seu significado ambiental, para auxiliar a interpretação da dinâmica vegetacional preservada no solo. Os resultados foram apresentados em gráficos, produzidos através de recursos dos softwares *Tilia* e *Tilia Graph*, softwares *Minitab* e *Excel*.

² PNW (*number of phytoliths per gram of soil*) grafia em inglês para facilitar a correlação com a literatura internacional

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização do solo

4.1.1 Caracterização Macromorfológica e Físico-Química

O perfil P1 apresenta sequência vertical de horizontes: A (0-20cm); AB (20-30cm); Bw1 (30-50cm); Bw2 (50-95cm); Bw3 (95-165cm) e Bw4 (165-200cm). O perfil P2 apresenta sequência vertical de horizontes: Terra do Formigueiro (20 - 0cm); A (0-10cm); AB (10-30cm); Bw1 (30-75cm); Bw2 (75-145cm) e Bw3 (145-240cm) (APÊNDICE A; Figura 2). Ambos os perfis, devido a sua proximidade na vertente, apresentam propriedades macromorfológicas semelhantes, textura argilosa, cor bruno avermelhado-escuro (2.5 YR 2,5/4) na maioria dos horizontes diagnósticos, estrutura variando de blocos subangulares pequenos a muito pequenos (horizonte A), blocos subangulares a angulares médios (AB) e blocos subangulares grande a pequeno que se desfazem em blocos subangular granular forte (Bw); ligeiramente plástico a muito plástico e ligeiramente pegajoso a pegajoso. Apresenta raízes abundantes médias e grandes nos horizontes superficiais e decresce em abundância e espessura em direção a base de ambos os perfis.

O P1 apresenta atividade biológica comum, cupins e formigas e macrocanais de formiga preenchidos com material mais escuro. O P2 apresenta feições macromorfológicas que expressam intensa atividade de formigas (sauveiro) com canais de diferentes dimensões e quatro tipos de painéis ou câmaras da colônia de formigas, que começam a se desenvolver a partir de 85cm de profundidade (Figura 4). Essas macrofeições foram diferenciadas em: (A) Painéis de armazenamento de folhas; (B) Painéis de cultivo de fungo; (C) Painéis de deposição de terra; (D) Painéis de resíduos (restos de fungos, vegetais e de formigas em diferentes graus de decomposição); e (E) macrocanais (conexão entre as painéis e galerias) (Figura 4).

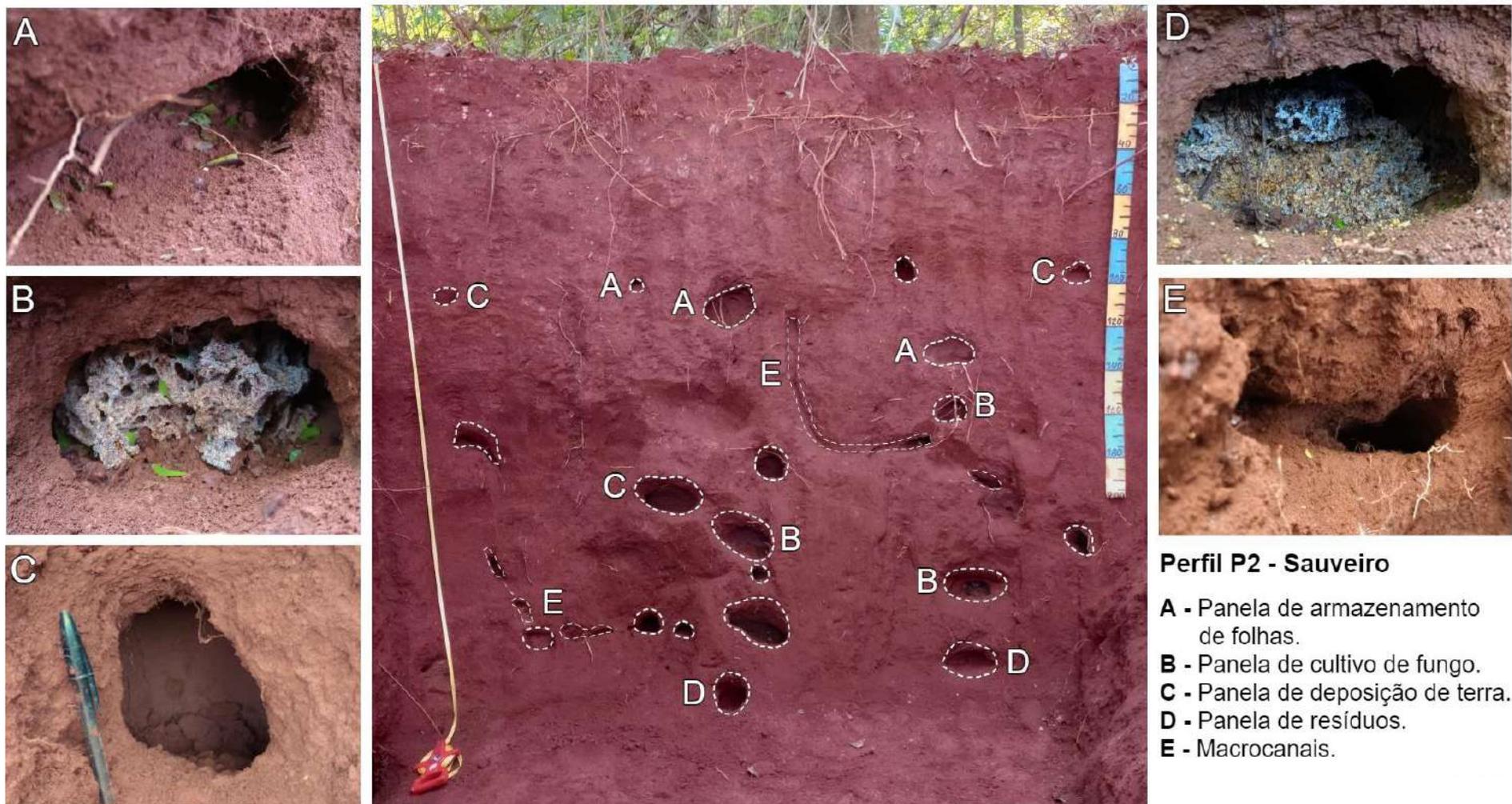


Figura 4: Aspecto do saueiro e panelas. Fonte: Autora.

A Tabela 4 apresenta os atributos físicos das amostras de solo (P1), materiais superficiais do formigueiro e panela de terra amostrados em diferentes profundidades do P2. Observa-se pouca variação na composição granulométrica ao longo do P1 e entre os materiais do formigueiro. Apresentam textura muito argilosa, variando entre 440,9 g.kg⁻¹ e 811,6 g.kg⁻¹. A densidade do solo (Ds) no P1 variou entre 1,05 (A) e 1,53 g.cm⁻³, e a densidade das partículas (Dp) variou de 2,50 a 2,94 g.cm⁻³ e a Porosidade Total (PT), entre 0,39 e 0,64 cm³.cm⁻³ (Tabela 4).

Tabela 4: Atributos físicos dos horizontes do P1 e materiais do formigueiro do P2.

Perfil	Horizonte/ Amostra	Prof. (cm)	Classes Granulométricas ¹			Silte/ Argila	Textura (Santos, 2018)	Ds _(g.cm ⁻³)_	Dp	PT cm ³ .cm ⁻³
			Argila	Silte	Areia					
P1	A	0-20	667,3	230,3	102,4	0,35	Muito Argilosa	1,15	2,63	0,56
	AB	20-30	640,6	272	87,4	0,42	Muito Argilosa	1,23	2,6	0,53
	Bw1	30-50	718,2	195,9	85,9	0,27	Muito Argilosa	1,53	2,5	0,39
	Bw2	50-95	822	113,5	64,5	0,14	Muito Argilosa	1,47	2,94	0,5
	Bw3	95-165	794	127,4	78,6	0,16	Muito Argilosa	1,08	2,6	0,58
	Bw4	165-200	795,5	131,6	72,9	0,17	Muito Argilosa	1,05	2,94	0,64
P2	TF ²	5-0	795,8	158,2	46	0,20	Muito Argilosa	n.d	n.d	n.d
	TF	10-0	834,5	58,5	107	0,07	Muito Argilosa	n.d	n.d	n.d
	PT ³	105	796	121,6	82,4	0,15	Muito Argilosa	n.d	n.d	n.d

¹ Classes granulométricas: Argila (<0,002 mm); Silte (0,002 mm a 0,006 mm) e Areia (0,006 mm a 2,0 mm); ² Topo do formigueiro; ³ Panela de terra; n.d: Não determinado.

Fonte: Autora.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos atributos químicos das amostras dos horizontes do P1, e das amostras de diferentes partes do formigueiro. Os valores de pH (H₂O) variam de 5,42 a 5,88 no P1 e de 5,41 a 6,72 nas amostras de material de formigueiro coletadas no P2. Os valores de CTC variaram entre 07,87 e 13,91 cmol_c.dm⁻³ no P1 e entre 06,92 a 18,02

cmol_c.dm⁻³ nos materiais do formigueiro no P2. A saturação por bases (V%) é maior em superfície (69,23%) e varia entre 61,53% e 64,72% no horizonte Bw4. A matéria orgânica reduz em profundidade de 28,64% para 3,49% na base do perfil. Destaca-se que nos horizontes Bw os valores mantem-se abaixo de 10%.

Nos materiais do P2, destaca-se o material das panelas de fungos (PFu), que apresentam elevados valores de CTC (18,02 cmol_c.dm⁻³), V% (83,79) e matéria orgânica (23,75%).

Tabela 5: Atributos químicos dos horizontes do P1 e materiais do formigueiro do P2.

Perfil	Horizonte/ Amostra	Prof. (cm)	pH		P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Ca+ Mg	Ca+ Mg+K	CTC	NT	V	MO
			H ₂ O	KCl	(mg dm ⁻³)	(mg L)	(cmol _c dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)				g.kg ⁻¹			
P1	A	0-20	5,42	5,1	3,49	0,43	7,11	2,09	4,28	9,2	9,63	13,91	19	69,23	28,64
	AB	20-30	5,62	4,59	1,49	0,17	5,49	1,58	5,76	7,07	7,24	13	113,1	55,71	25,15
	Bw1	30-50	5,85	4,88	4,41	0,09	4,8	1	3,68	5,8	5,89	9,57	102,6	61,53	9,08
	Bw2	50-95	5,82	4,95	2,99	0,04	4,32	0,94	3,12	5,26	5,3	8,42	97,2	62,93	6,29
	Bw3	95-165	5,88	5,49	2,66	0,04	4,01	0,87	2,95	4,88	4,92	7,87	97,8	62,51	4,89
	Bw4	165-200	5,86	5,52	1,41	0,2	4,41	0,8	2,95	5,21	5,41	8,36	87,7	64,72	3,49
P2	TF ¹	5-0	5,41	5,5	1,99	0,51	3,35	1,22	2,95	4,57	5,08	8,03	0,5	63,27	2,79
	TF	20-10	5,9	5,27	2,74	0,12	2,337	1,043	3,42	3,38	3,5	6,92	0,5	50,58	2,1
	TF	10-5	6,26	5,8	4,66	0,22	9,415	2,935	3,18	12,35	12,57	15,75	n.d.	79,81	22,35
	TF	5-0	6,11	6	7,99	0,39	9,82	2,56	2,74	12,38	12,76	15,5	0,5	82,32	48,2
	PT ²	105	5,18	5,46	1,99	0,23	3,251	1,037	3,18	4,29	4,52	7,7	0,9	58,69	4,19
	PF ³	170	6,38	5,59	7,08	0,93	5,243	1,111	3,18	6,35	7,29	10,47	6,1	69,62	8,38
	Pfu ⁴	260	6,72	6,46	20,83	8,34	3,326	3,582	2,95	6,91	15,25	18,2	19	83,79	23,75

¹Topo do formigueiro; ²Panela de terra; ³Panela de folhas; ⁴Panela de fungos.

Fonte: Autora.

Os valores dos índices DSI, STI e Ki obtidos para as amostras do P1 apresentam relativa estabilidade ao longo do perfil com sutis diferenças entre o horizonte superficial e os horizontes diagnósticos (Tabela 6). Os valores de DSI variaram entre 0,52 em A e 0,68 no Bw, o STI variou de 43,36 a 47,39 e o KI, de 1,98 a 2,02. Esses valores refletem elevado grau de intemperismo.

Tabela 6: Índices de Intemperismo.

Índice	A	Bw2	Bw4
DSI	0,52	0,68	0,65
STI	43,36	47,39	46,51
Ki	1,98	2,02	2

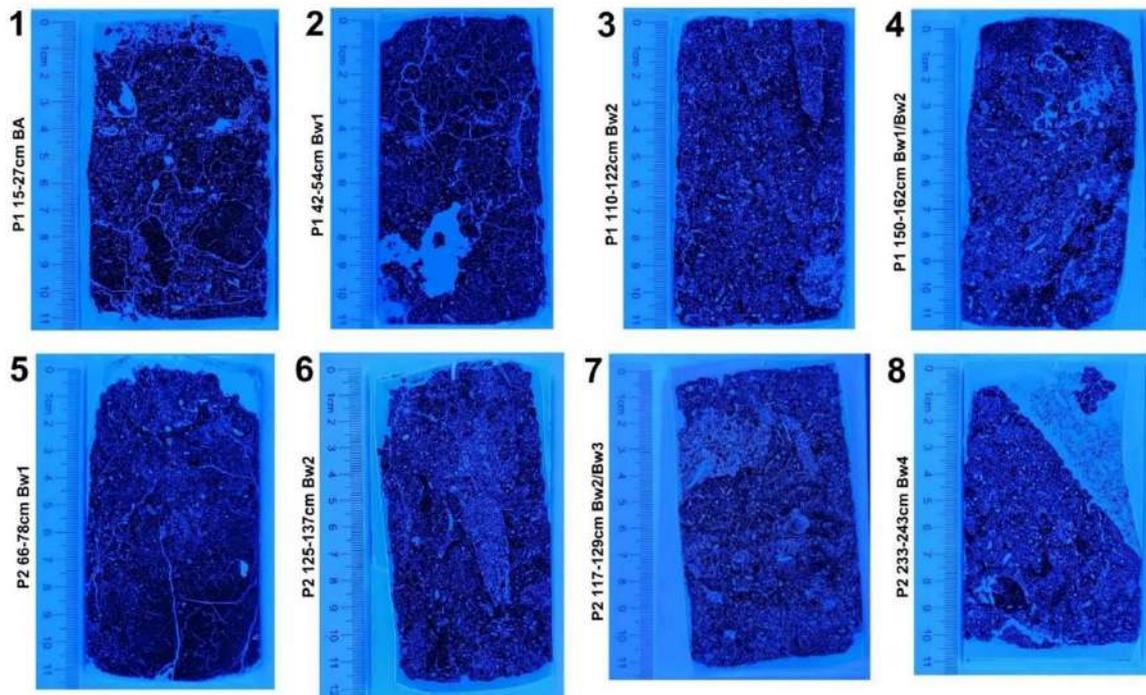
Fonte: Autora.

Considerando os atributos macromorfológicos do solo, físicos e químicos, ambos os perfis de solo foram classificados como LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico.

4.1.2 Caracterização Micromorfológica

As lâminas e blocos polidos ilustram a ocorrência dos processos pedogenéticos característicos dos Latossolos e são compostas por uma trama complexa de feições biológicas sobrepostas, o que dificulta reconhecer a ordem de ocorrência e/ ou formações das feições (APÊNDICE B; Figura 5).

Blocos Polidos



Lâminas Delgadas

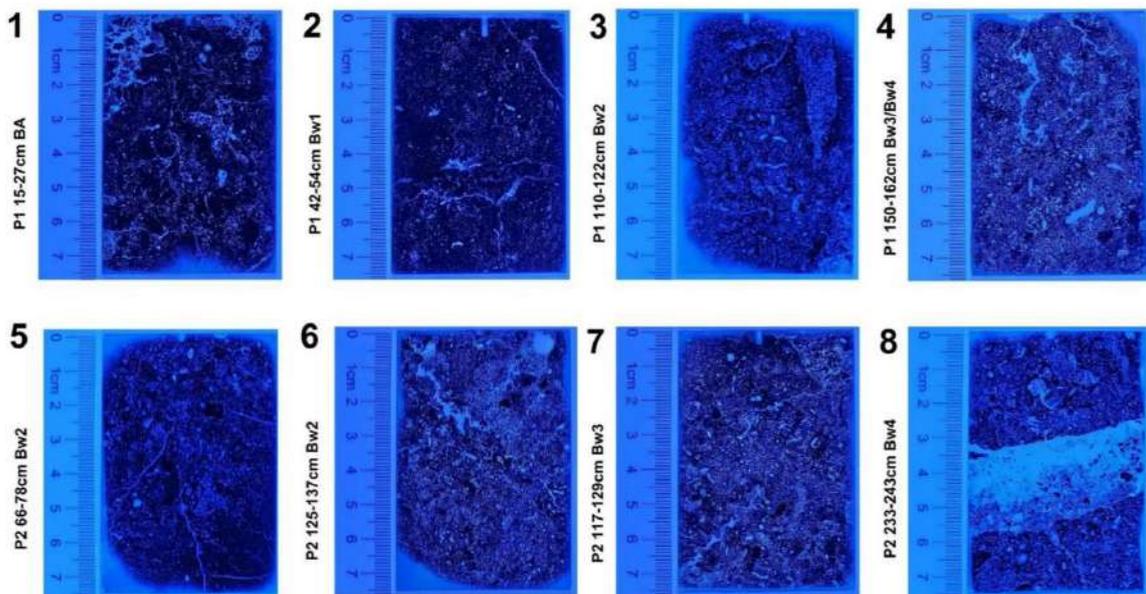


Figura 5: Blocos polidos e lâminas delgadas sob luz UV – destaque para a porosidade das amostras. Fonte: Autora.

Os solos descritos em ambos os perfis apresentam microestrutura bem semelhantes. São homogêneos em relação a sua trama porfírica e microestrutura em blocos subangulares de pedalidade forte, grandes, médios e pequenos nas lâminas dos horizontes BA, Bw1 e Bw2 e granular nos horizontes Bw3 e Bw4 (Figura 6).

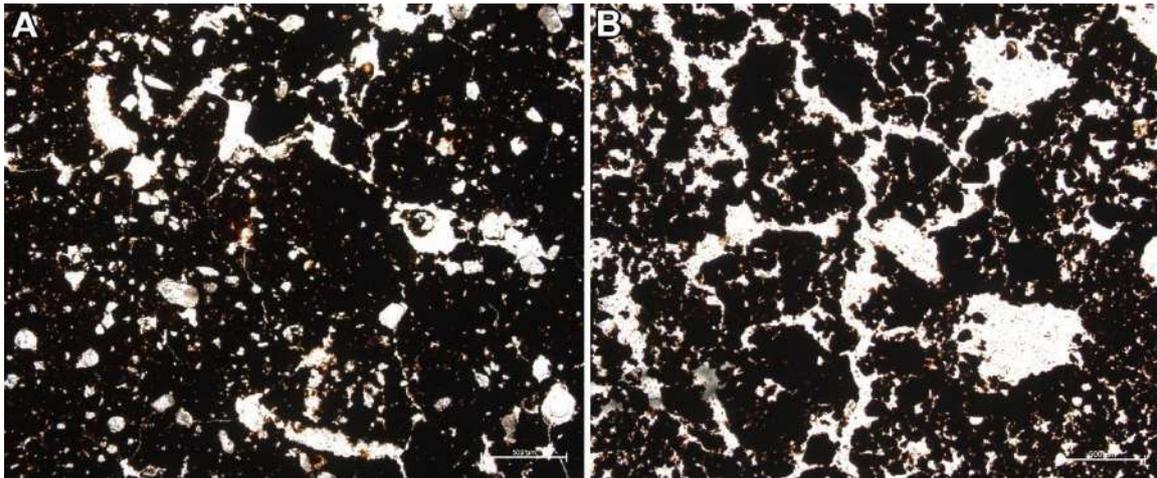


Figura 6: Trama porfírica. A (P1, Lâmina 1); B (P2, Lâmina 5). Fonte: Autora.

De modo geral o material grosso está organizado aleatoriamente no fundo matricial em todas as lâminas, aparecendo menos frequentemente em profundidade. As fábricas birrefringentes são, em sua maioria anisotrópicas ou indiferenciadas, à exceção do horizonte Bw1 do P1, que apresenta sinais de compactação/adensamento, reflexo do uso da terra anterior à instalação da floresta, há cerca de 20 anos.

A porosidade é abundante, formada por muitos bioporos de grande extensão, principalmente após o horizonte Bw2 em ambos os perfis (Figura 7). Observa-se na maioria das lâminas adensamento evidente na trama porfírica e preenchimentos densos contínuos e soltos contínuos como ilustrado na Figura 8. Verificam-se raízes e resíduos biológicos em baixo grau de desintegração (Figura 9), bem como excrementos envelhecidos de coalescência e desintegração moderadas. Essas propriedades assinalam intensa atividade biológica, atual e pretérita, em ambos os perfis.

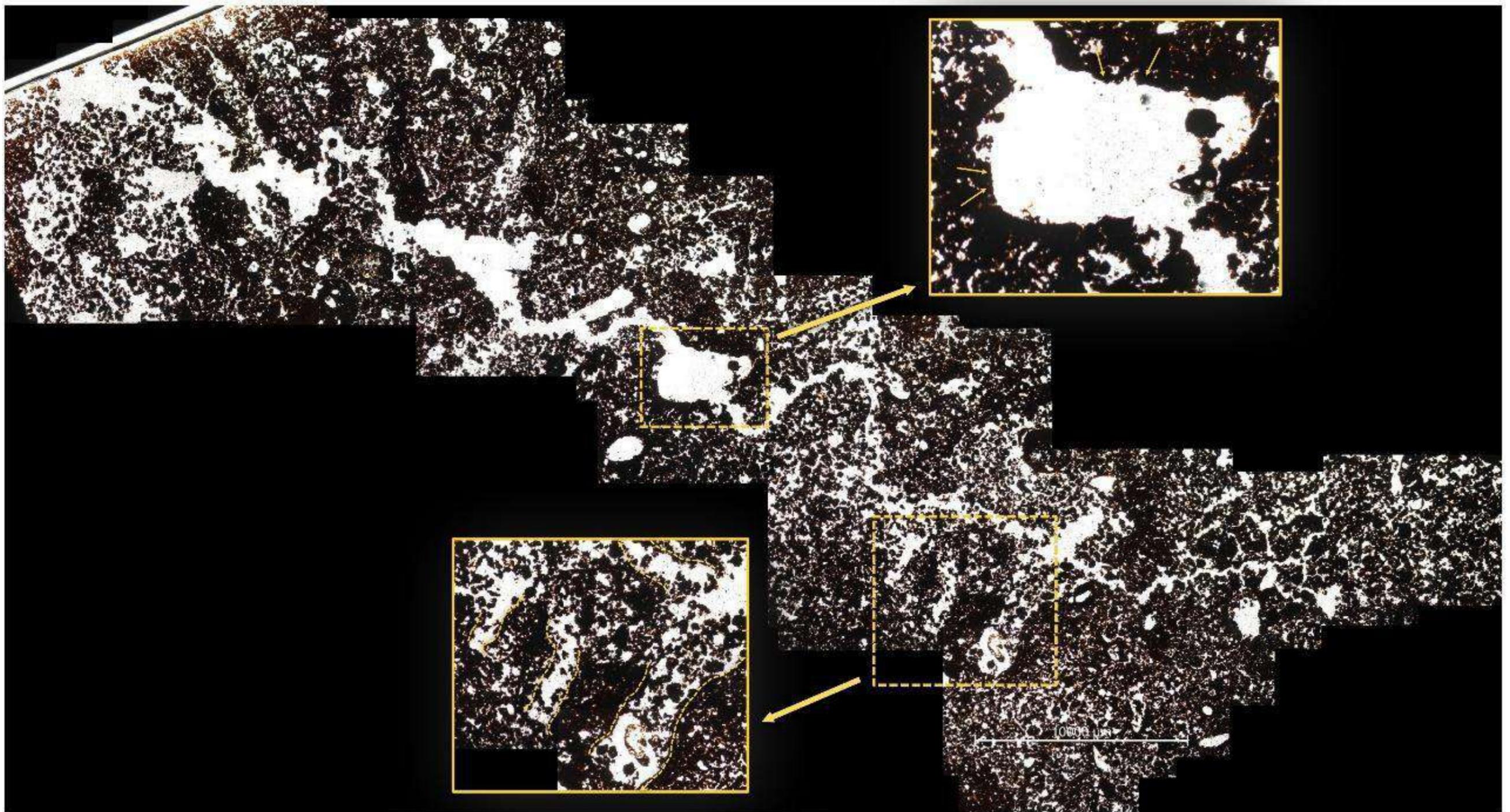


Figura 7: Extensão de um bioporo produzido por saúvas (lâmina 7, P2). A – Bioporo com paredes picotadas; B – Bioporos com preenchimentos soltos. Fonte: Autora.

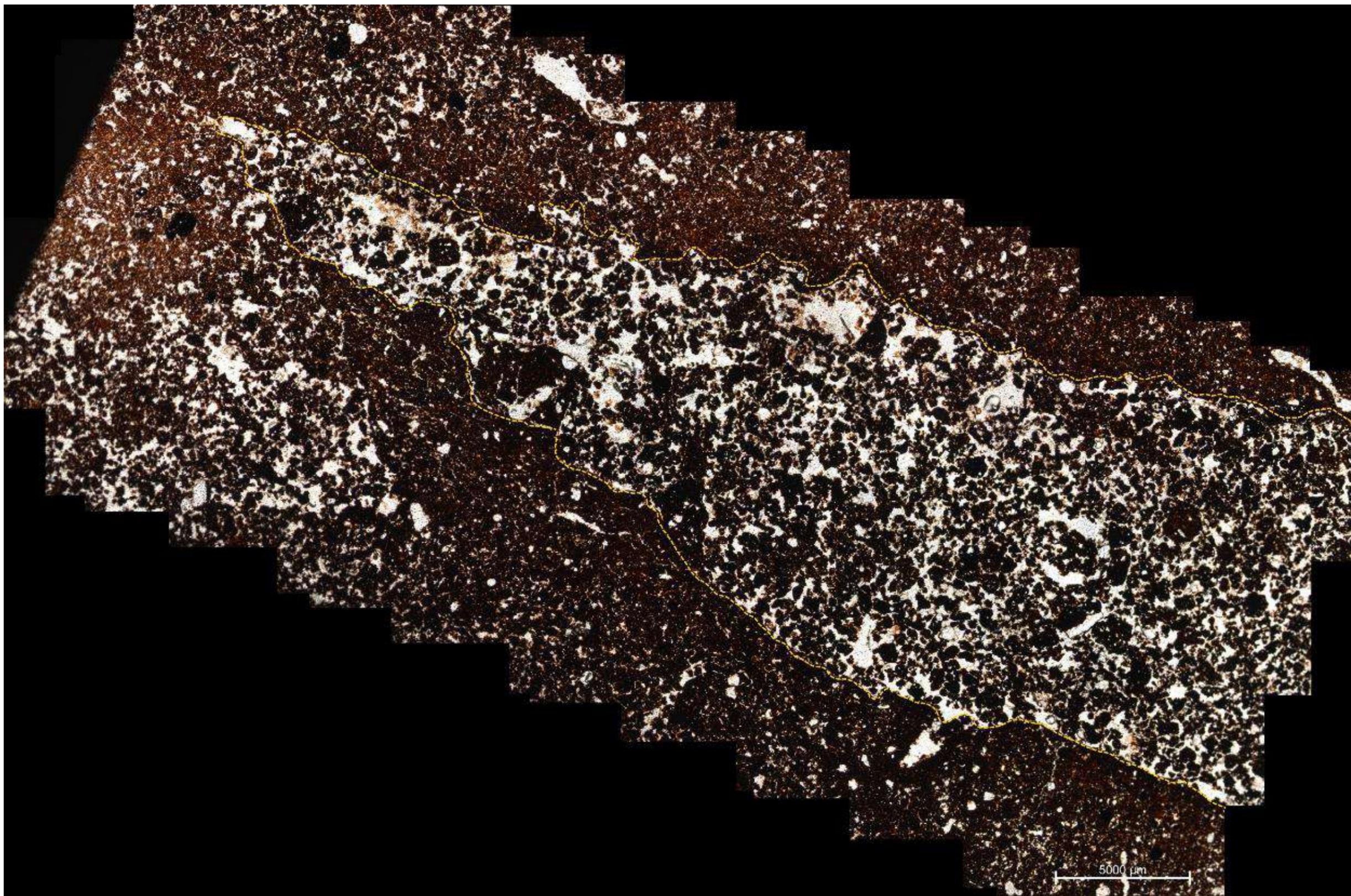


Figura 8: Bioporo com preenchimento solto contínuo (lâmina 6, P2). Fonte: Autora.

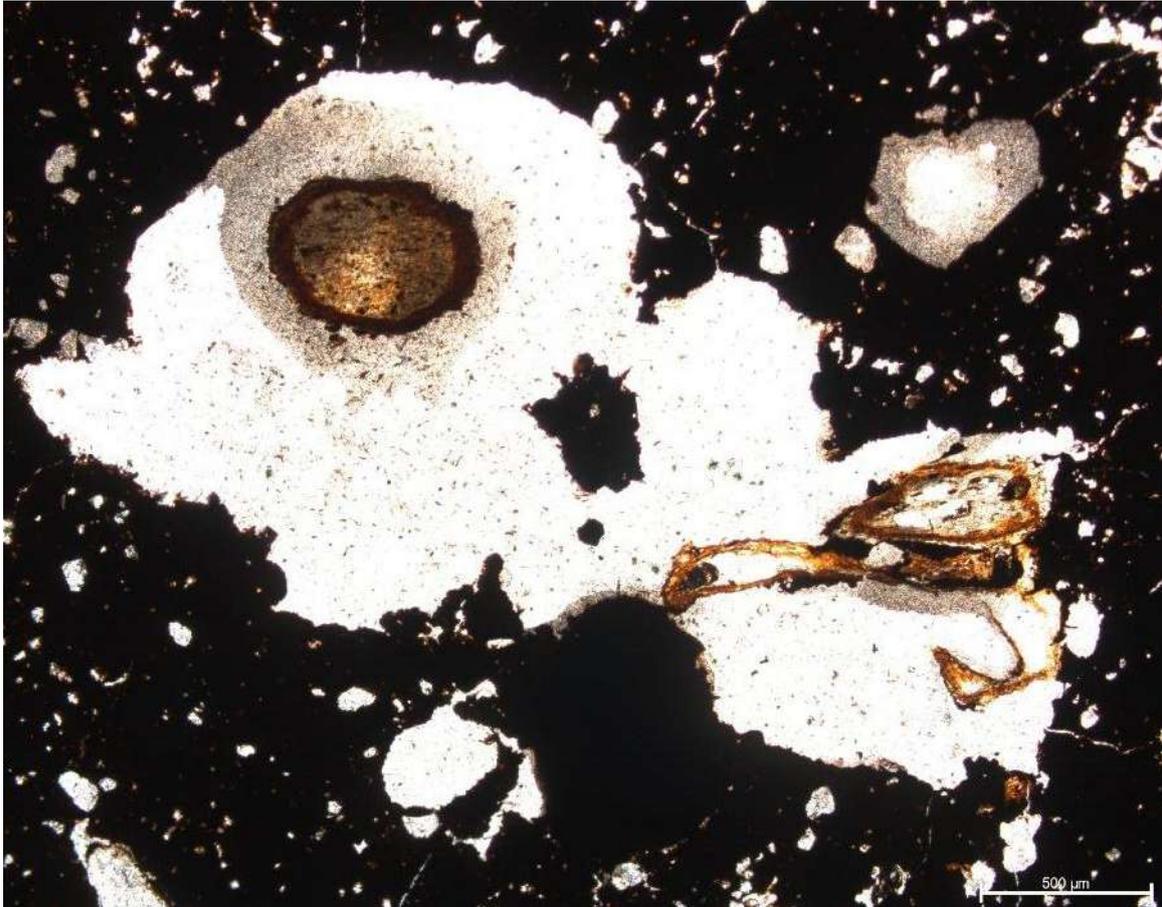


Figura 9: Seção transversal de raízes (lâmina 1, P1). Fonte: Autora.

Mudanças sutis observadas na estrutura e densidade dos horizontes, refletem-se também na porosidade. A Porosidade Total calculada nos blocos polidos (PT%) tende a aumentar em profundidade, apresentando evidências claras de bioturbação por formigas, além de plantas e outros animais. Inúmeros poros sobrepõem-se na matriz do solo, dentre estes, destacam-se os poros complexos de tamanho grande ($>1000 \mu\text{m}$), como o tipo (combinação forma-tamanho) mais comum ao longo dos perfis e com aumento em profundidade (Figura 10). A área ocupada por poros arredondados de tamanho médio ($15600\text{-}156000 \mu\text{m}^2$) predomina na maior parte das amostras, formato característico de solos bem estruturados. A amostra 5 do P2 (46 – 58cm) apresentou o menor valor de porosidade total (3,55%), por representar uma seção compactada de solo.

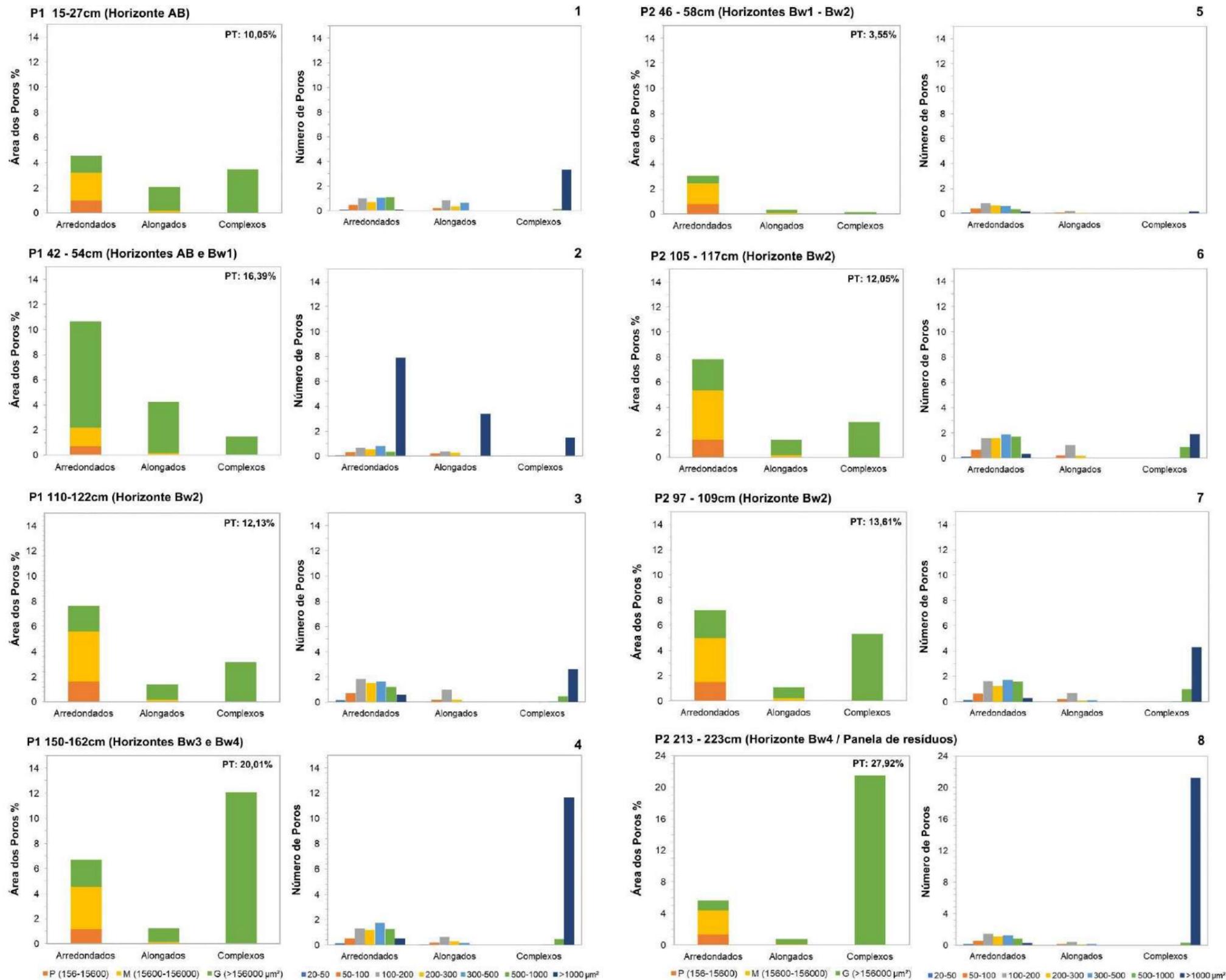


Figura 10: Porosidade total dos blocos polidos. Fonte: Autora.

A intensa bioturbação é evidente a olho nú no P2, pela ocorrência de feições do saueiro. A análise micromorfológica revelou que no P1, embora as feições sejam pouco evidentes devido à obliteração causada pelos processos pedogenéticos característicos dos Latossolos, a bioturbação também é muito intensa, com evidências de feições sobrepostas espacial e temporalmente na matriz do solo. Esses processos contribuem ao longo do tempo para a homogeneização do solo e para a formação de microagregados estáveis, como verificado a partir do Bw2 até a base dos perfis.

A presença de formigas é constatada pela ocorrência de bioporos com paredes “picotadas”, característica destes animais em ambos os perfis (Figuras 11 e 12), sobretudo no P2. Ademais, foi observada a atuação de minhocas na lâmina mais superficial no horizonte AB do P1.

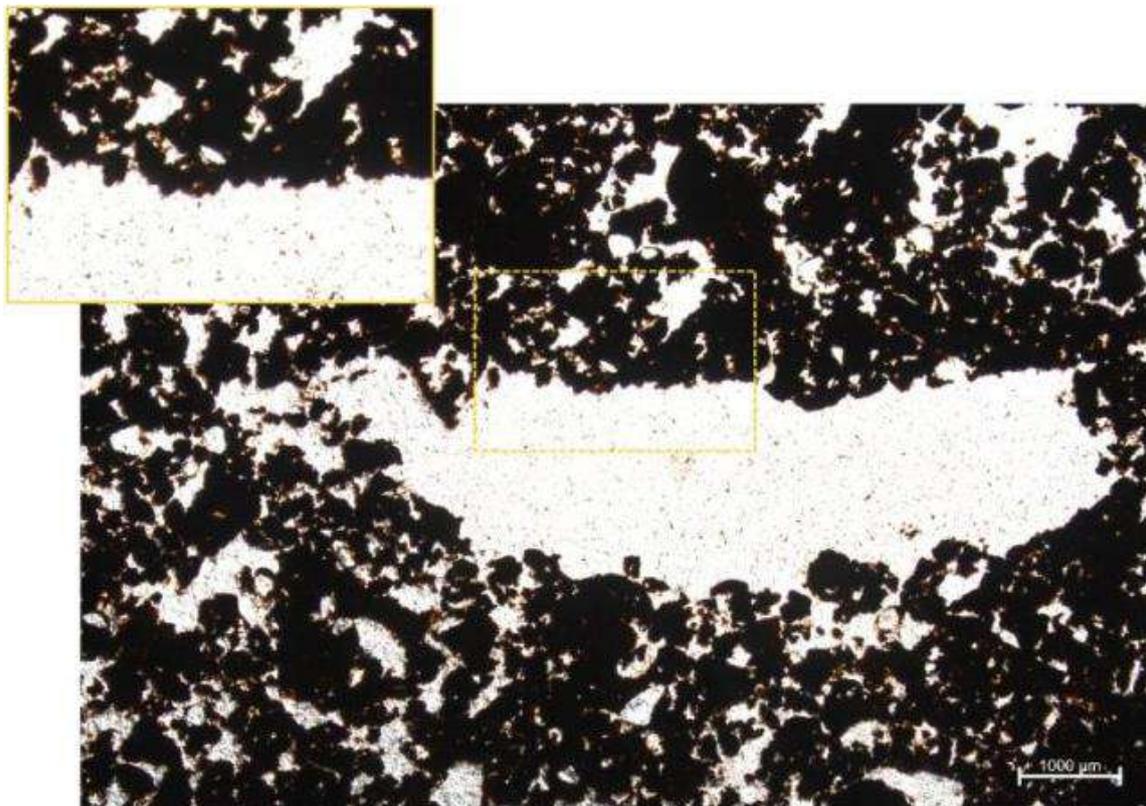


Figura 11: Paredes picotadas em bioporos sem preenchimento (lâmina 4, P1). Fonte: Autora.

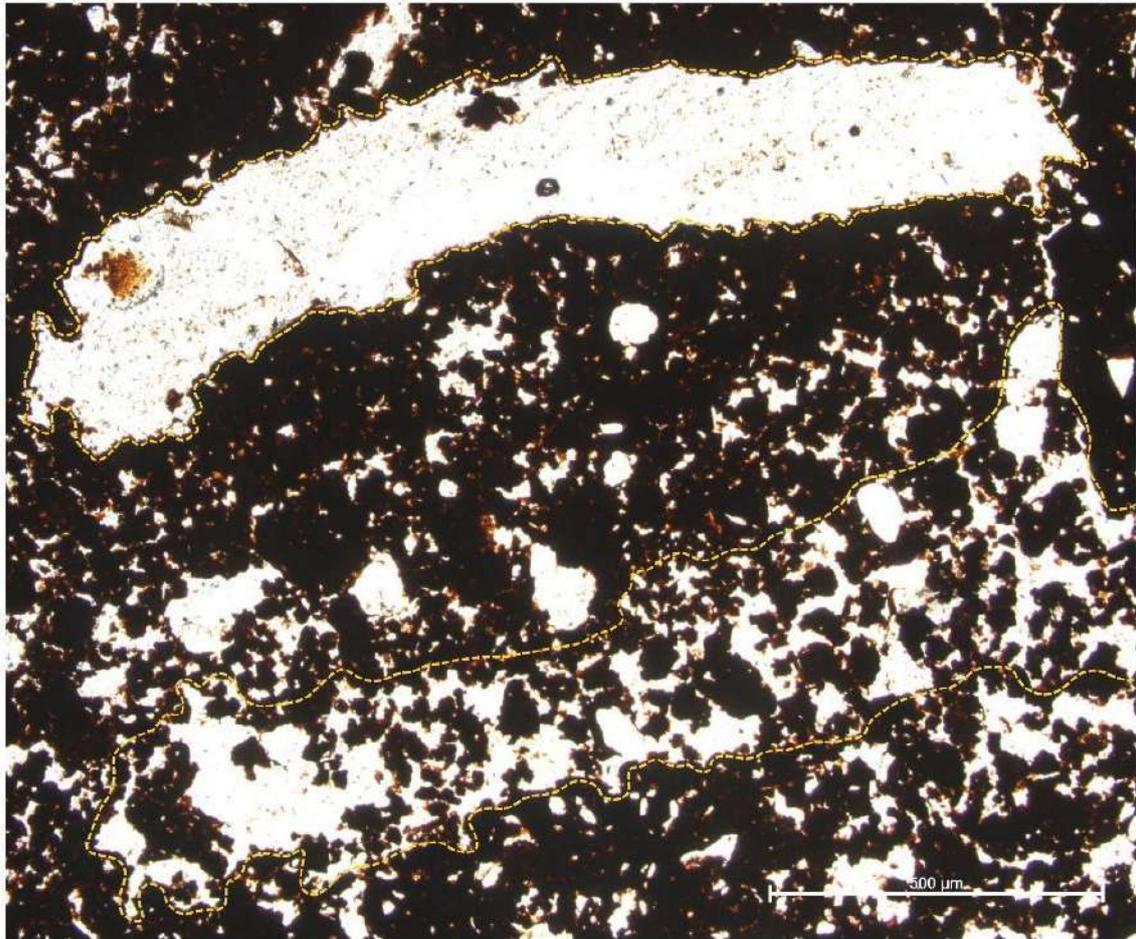


Figura 12: Bioporos com paredes picotadas sem e com preenchimento de microagregados (lâmina 7, P2). Fonte: Autora.

A atividade das formigas observada na lâmina 8 do P2, que corresponde ao material de uma panela de resíduos do saueiro na base do perfil, expressa a atividade forrageira da colônia e a incorporação de fitólitos no solo (Figura 13). Nesse material foram identificadas células de sílica biogênica em tecidos vegetais em diferentes estágios de decomposição (Figuras 14 e 15). A panela de resíduos é constituída de restos de material vegetal como folhas e gravetos, cadáveres das próprias formigas, antigas asas eliminadas por indivíduos alados, resíduos do fungo cultivado pela colônia e terra solta.

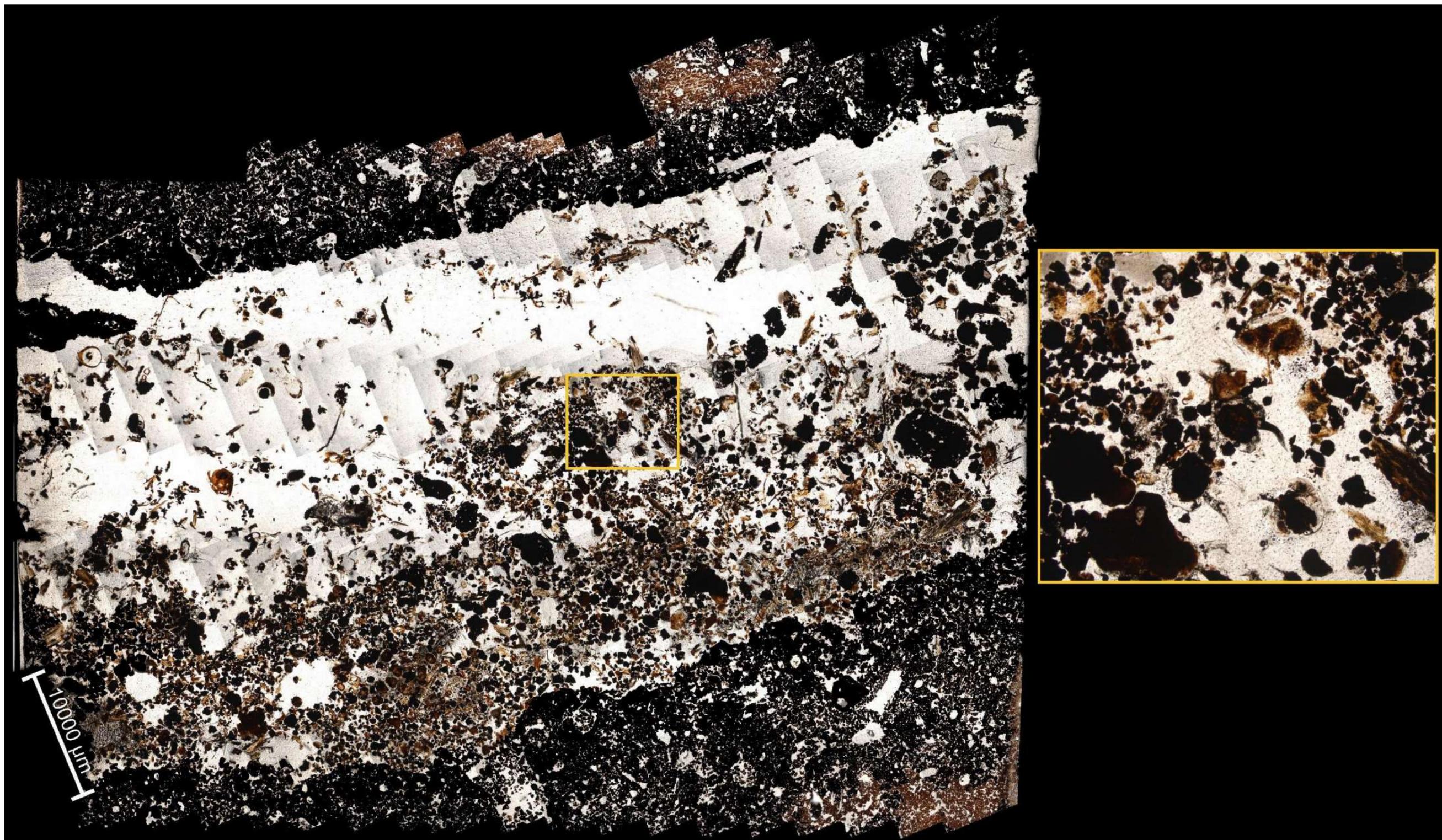


Figura 13: Corte transversal em panela de resíduos (lâmina 8, P2) – em destaque um aparente cadáver de formiga. Fonte: Autora.

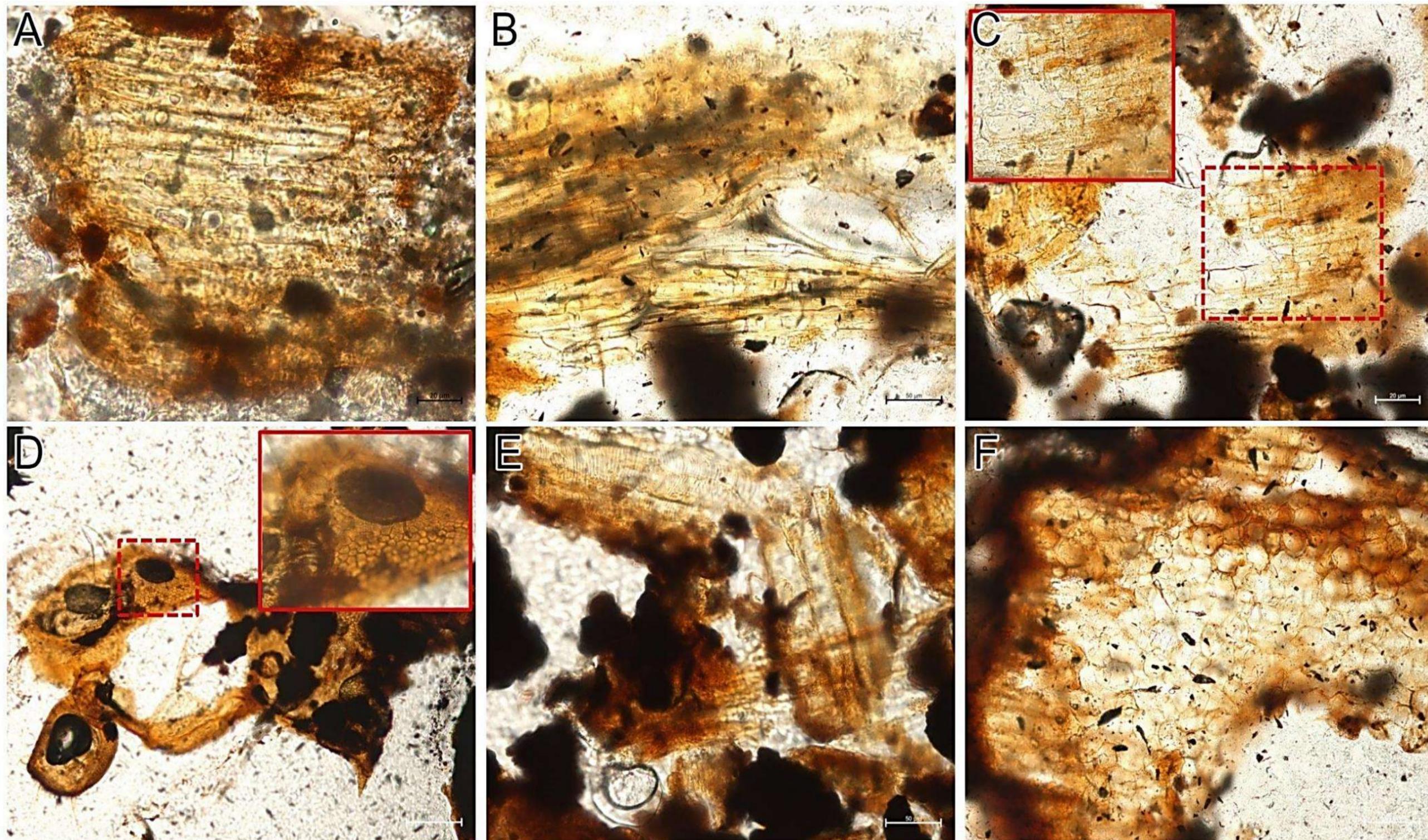


Figura 14: Restos vegetais com esqueletos de sílica (articulados de fitólitos) encontrados na panela de resíduos (lâmina 8- Hz Bw4, Perfil 2). A) Tecido vegetal com células esféricas; B) Fitólitos tabulares, alongados e acutes (?); C) Células tabulares; D) Tecido com corpos poligonais; E) Fitólitos do tipo traqueia; F) Fitólitos poligonais. Fonte: Autora.

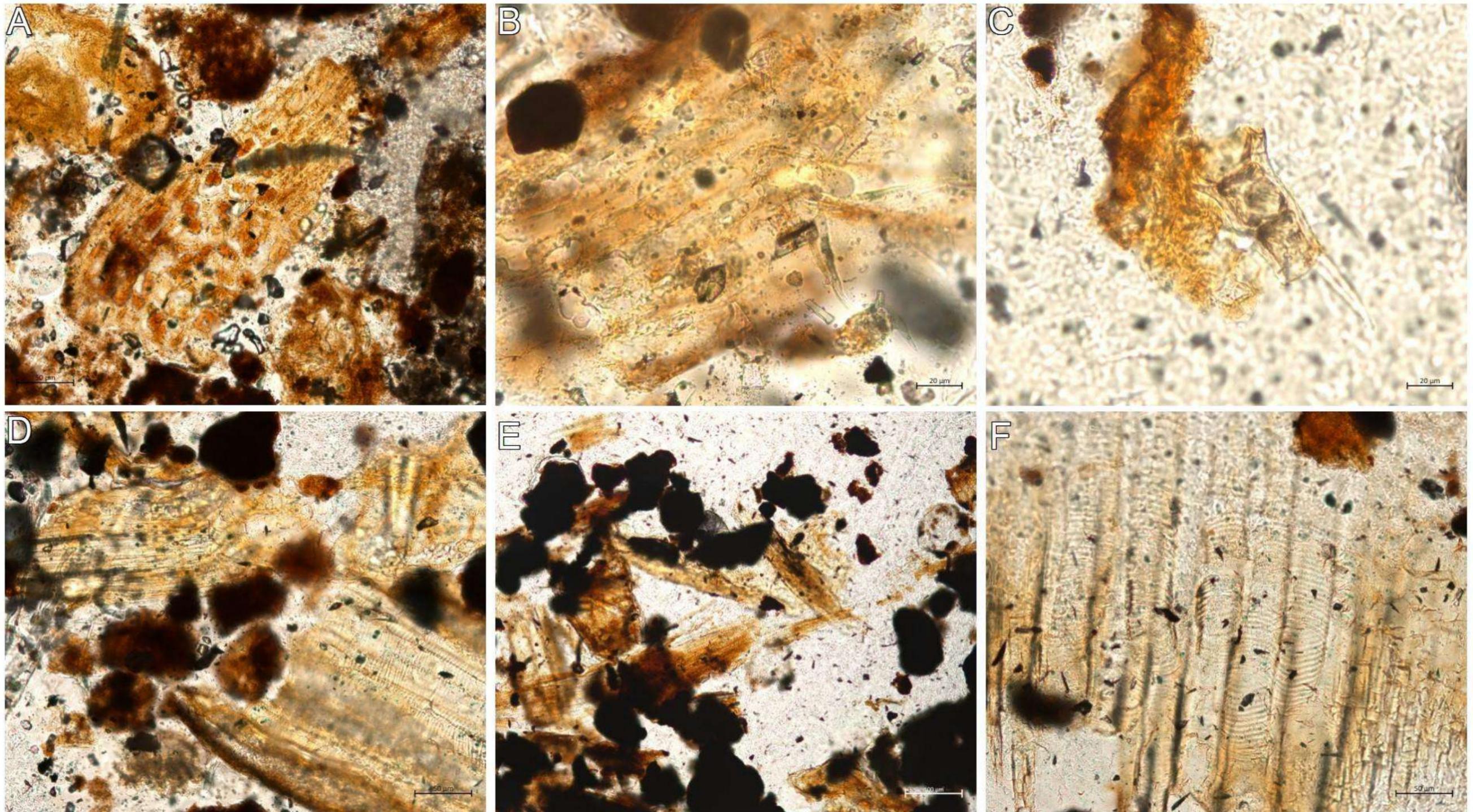


Figura 15: Restos vegetais com esqueletos de sílica. A) Tecido vegetal com células silicificadas não identificadas; B) Fitólitos tipo bulliforme, ameboidal, entre outras; C) Fitólito tipo acute (quebrado); D-F) Fitólitos do tipo traqueias. Fonte: Autora.

4. 2 Idade ¹⁴C, Carbono Orgânico Total (COT) e δ¹³C

A Tabela 7 apresenta os resultados de datação ¹⁴C. As idades decrescem em profundidade e variam entre 2135-2349 e 6403-6997 anos cal. AP (Tabela 7).

Tabela 7: Idades radiocarbono ¹⁴C.

Amostra	Nº de Laboratório	Idade (anos AP)	Idade Calibrada* (anos cal AP)	Probabilidade Mediana*
P1 50 - 60 cm	UGAMS 67231	2294 ± 49	2135 - 2349	2230
P2 40 - 50cm	UGAMS 67230	2932 ± 29	2930 - 3163	3031
P2 80 - 90cm	UGAMS 67229	5103 ± 33	5716 - 5915	5815
P2 220 - 230cm	UGAMS 67228	5922 ± 121	6403 - 6997	6708

*Programa CALIB 8.2, curva SH CAL 20; Referência: SHCal20 Southern Hemisphere calibration, 0-55,000 years cal BP. Radiocarbon 62. doi: 10.1017/RDC.2020.59.

Fonte: Autora.

Os valores de COT reduzem de 23g.kg⁻¹ no topo a 2,8 g.kg⁻¹ na base do P1 (Figura 16). Mesma tendência foi observada no P2, que varia de 20,1 g.kg⁻¹ a 02,2 g.kg⁻¹, do topo para a base. Valores variados foram obtidos com os materiais do formigueiro, sendo a panela de resíduos (265-277cm) a que apresenta maior teor de COT 187,5 g.kg⁻¹.

Os valores isotópicos ao longo dos perfis apresentam variação isotópica >4‰, assinalando mudança de estrutura de vegetação ao longo do tempo. A mata plantada existente na área do perfil (referência moderna), representada pelas amostras 0-10cm do P1, apresenta valor δ¹³C de -25,10‰ (APÊNDICE C; Figura 17). Da base para o topo desse perfil, observa-se empobrecimento isotópico maior que 8‰, variando de -18,69‰ (200cm) à -25,10‰ no topo do perfil, sendo o menor valor, -16,83‰, encontrado a 15cm de profundidade no P1.

O P2, devido à proximidade, apresenta variação isotópica semelhante à do P1. Destacam-se os valores isotópicos de -25,43‰ (20-30cm) e de -17,40‰ (120-130cm), que assinalam mudança na estrutura da vegetação. Os valores mais enriquecidos são verificados a partir de 100cm até a base do perfil. Este perfil apresenta um padrão mais errático na distribuição dos valores isotópicos entre 70 cm (onde inicia o saueiro) e 240 cm.

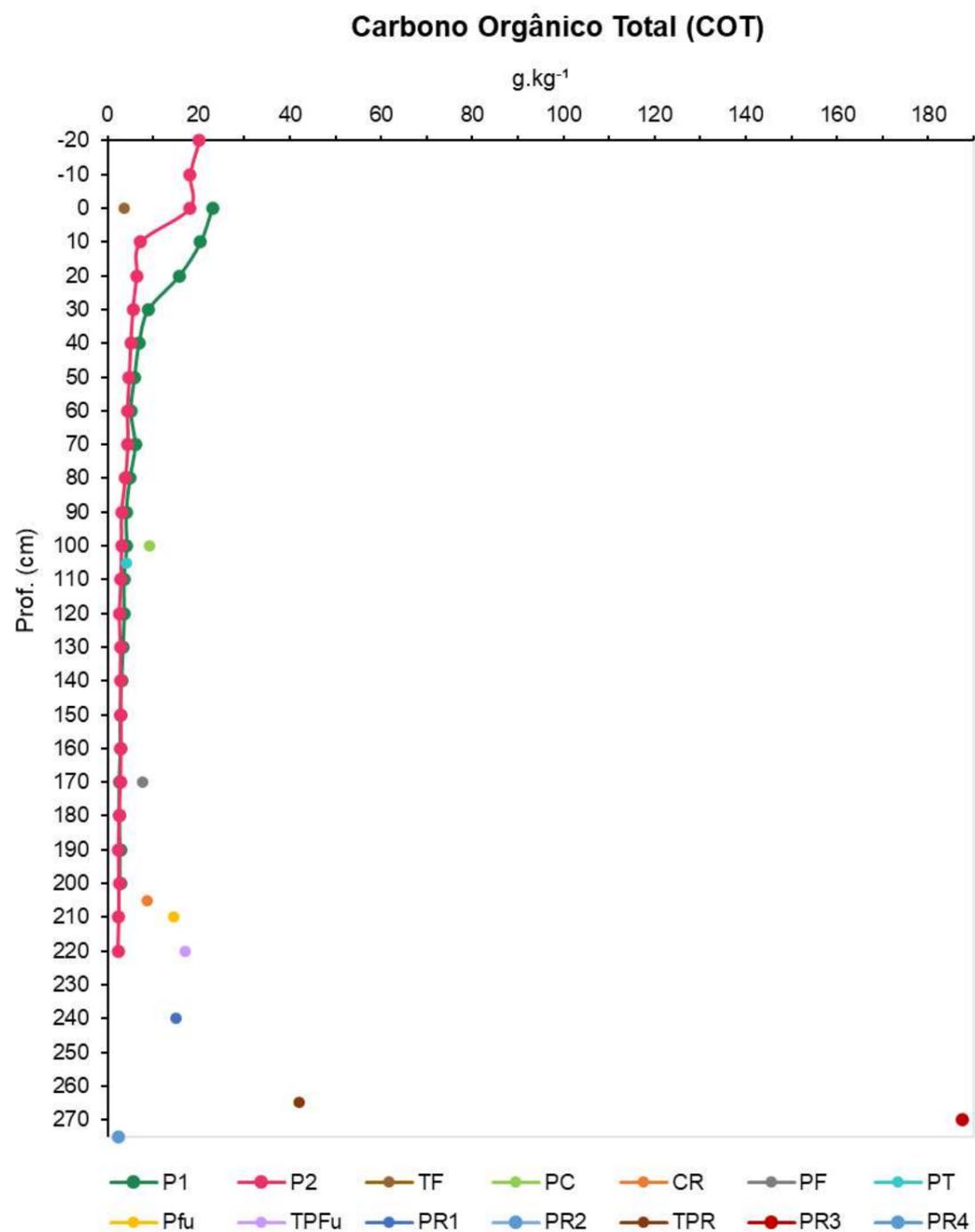


Figura 16: Valores de Carbono Orgânico Total em P1 e P2 e materiais do formigueiro. TF: Topo do formigueiro; PC: Preenchimento de canal; CR: Canal com resíduos; PF: Panela de folhas; PT: Panela de terra; PFu: Panela de fungos; TPFu: Terra da panela de fungos; PR: Panela de resíduos; TPR: Terra da panela de resíduos. Fonte: Autora.

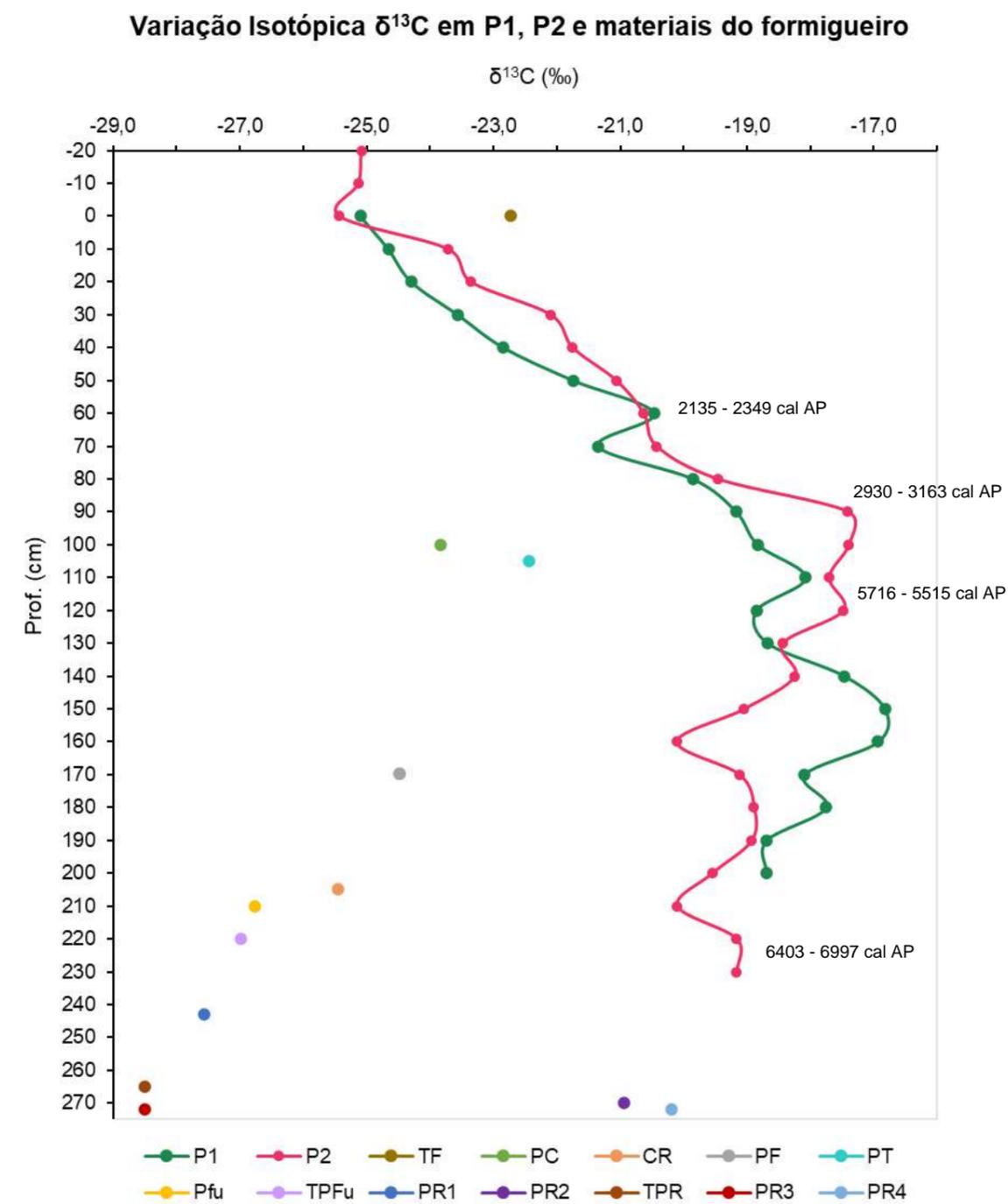


Figura 17: Variação Isotópica $\delta^{13}\text{C}$ em P1 e P2 e materiais do formigueiro. TF: Topo do formigueiro; PC: Preenchimento de canal; CR: Canal com resíduos; PF: Panela de folhas; PT: Panela de terra; PFu: Panela de fungos; TPFu: Terra da panela de fungos; PR: Panela de resíduos; TPR: Terra da panela de resíduos. Fonte: Autora.

Valores $\delta^{13}\text{C}$ variados foram observados nos materiais do formigueiro. As painelas de folha e painela de resíduos (que contém restos de folhas) apresentaram valores isotópicos empobrecidos, variando entre $-28,50\text{‰}$ a $-20,17\text{‰}$ (Figura 17).

As painelas de fungo apresentaram valores isotópicos empobrecidos, variando de $-27,38$ a $-26,77\text{‰}$. As painelas de terra e o topo do formigueiro apresentaram valores em torno de -22‰ , destaca-se a amostra do solo abaixo da painela de resíduos a 280cm de profundidade que apresentou valor isotópico de $-28,50\text{‰}$. Os preenchimentos de canais apresentaram valores de $-25,46\text{‰}$ e $-23,83\text{‰}$.

4.3 Análise Fitolítica

4.3.1 Caracterização da FIA

A fração insolúvel ao ácido (FIA) representa o resíduo remanescente da extração de fitólitos do solo e nesse estudo é caracterizada pela presença de fitólitos, carvões e fragmentos de minerais, classificados como não fitólitos (Figura 18).

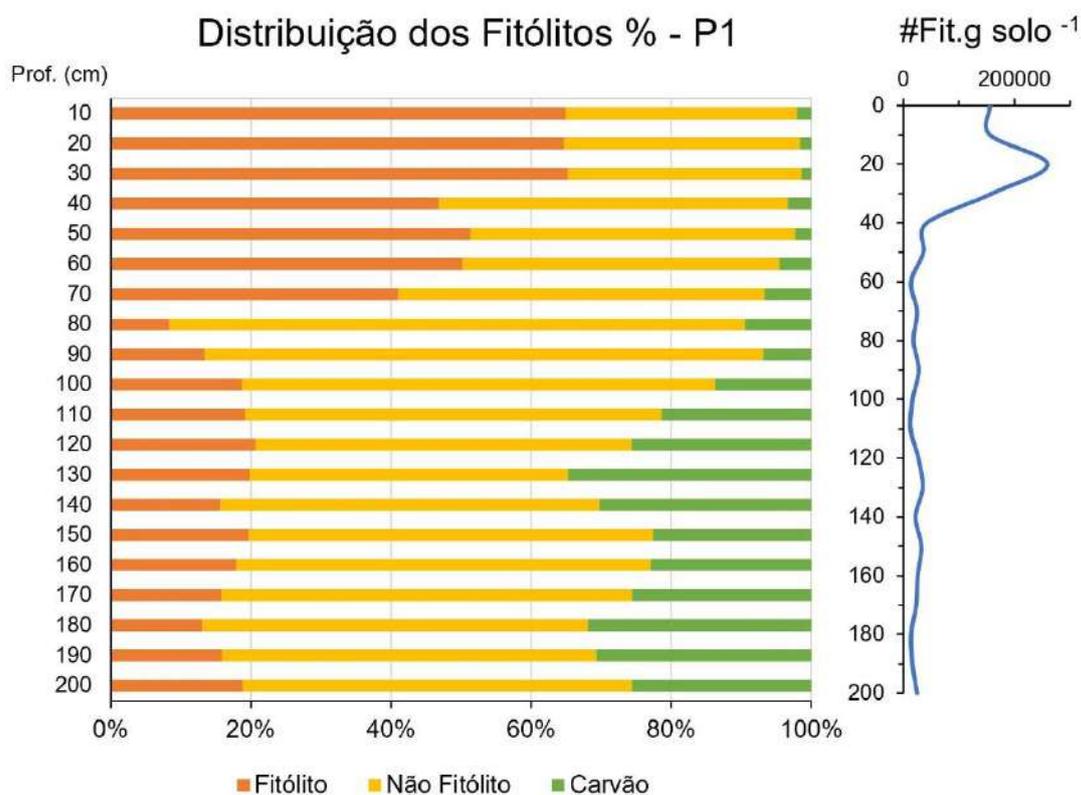


Figura 18: Concentração de fitólitos no P1. Fonte: Autora.

O P1, caracterizado como um solo de referência de atividade biológica comum, apresenta variações na concentração de número de fitólitos, não fitólitos e carvões por grama de solo nas amostras analisadas. Verifica-se maior concentração de fitólitos até 70cm. Nessas profundidades observou-se que o número de fitólitos por grama de solo ($\#Fit. g\ solo^{-1}$) variou de 14.320 a 260.243 e representam em torno de 55% da FIA. A partir de 70cm a média é de 63.503 $\#Fit. g\ solo^{-1}$ (± 134.530), representando em torno de 17% da FIA. Destaca-se amostra a 120cm que apresentou um valor de 526.843 $\#Fit. g\ solo^{-1}$ (21% da FIA).

No P2, perfil descrito sobre saueiro, a média do número de fitólitos no material do saueiro em superfície (20-0cm) é de 54.606 $Fit. g\ solo^{-1}$ (Figura 19).

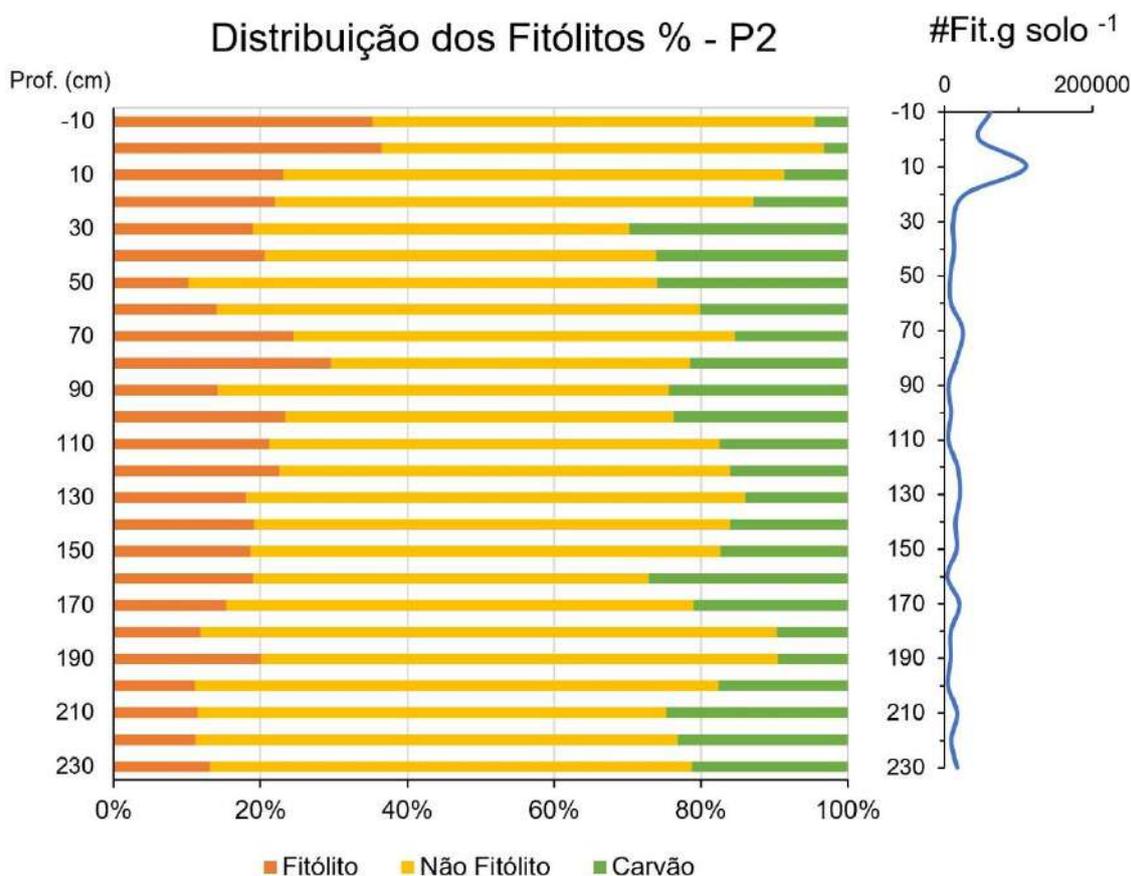


Figura 19: Concentração de fitólitos no P2. Fonte: Autora.

A média encontrada nos primeiros 40cm do perfil que é de 45.460 $Fit. g\ solo^{-1}$ (± 37.558) e representa em torno de 27% da composição da FIA. A partir de 40cm, nota-se uma redução do número de fitólitos em profundidade,

mantendo em média 12.695 Fit. g solo⁻¹ (± 6.163), que representa cerca de 17% da FIA.

Os carvões são frequentes nos horizontes subsuperficiais do P1, representando cerca de 26% (± 12) da FIA. No P2 apresenta distribuição irregular, com média 18% (± 7) ao longo perfil variando entre 3% (material do suaveiro em superfície) e 30% (20-30cm) (Figura 5).

Os fragmentos minerais (não fitólitos) representam, em média, 54% (± 13) da FIA, variando entre 33% em superfície e 55% na base do P1. No P2 observa-se que esses fragmentos aumentam do topo para a base do perfil, e representam em média 63% ($\pm 6,7$) da FIA (Figura 5).

4.3. 2. Constituição e tafonomização das assembleias de fitólito

A análise de fitólitos foi realizada em 20 amostras do P1 (0-200cm) e no P2 foram analisadas 24 amostras do P2 (0-250cm) e 12 amostras de materiais do formigueiro. A contagem detalhada da assembleia de fitólitos de P1 e P2 é apresentada no Apêndice D. A assembleia fitolítica do solo apresentou variações em sua composição e distribuição *intra* e entre os perfis de Latossolo e as amostras do formigueiro. Foram identificados 28 morfotipos distintos no material analisado, ocorrendo em células simples ou em articulados de fitólitos (APÊNDICE D; Figuras 20 e 21).

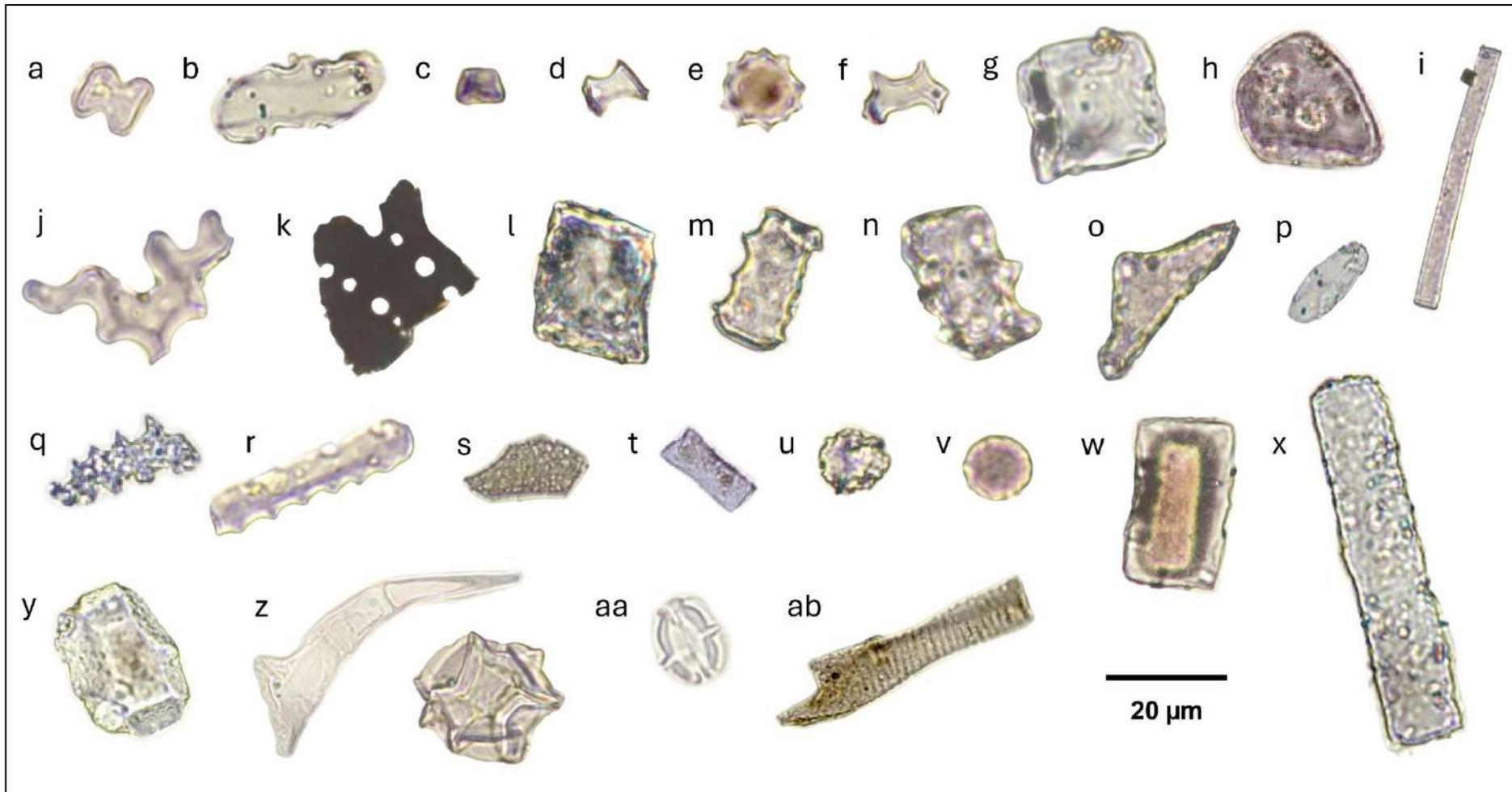


Figura 20: Morfotipos de fitólitos dos perfis de solo: a) BILOBATE; b) CRENATE; c) TRAPEZIFORM; d) SADDLE; e) SPHEROID ECHINATE; f) SADDLE COLLAPSED; g) BLOCKY; h) BULLIFORM FLABELLATE; i) ELONGATE ENTIRE; j) AMEBOIDAL; k) ASTERACEAE PLATELET; l) BLOCKY CAVATE; m) BLOCKY ECHINATE; n) BLOCKY SINUATE; o) Brachiate.; p) ELIPSOIDAL PSILATE; q) ELONGATE DENTATE; r) ELONGATE SINUATE; s) POLYGONAL; t) RETANGULAR; u) SPHEROID ORNATE; v) SPHEROID PSILATE, w) TABULAR; x) TABULAR ELONGATE; y) TABULAR POLYGONAL; z), ACUTE BULBOUS; aa) STOMATE; ab) TRACHEID. Fonte: Autora.



Figura 21: Articulados de fitólitos encontrados na serrapilheira e painéis dos formigueiros. Fonte: Autora.

No perfil P1, as células de sílica biogênica produzidas por Eudicotiledôneas são predominantes, representando, em média, 44% da assembleia fitolítica por camada (Figura 22). Esse predomínio é mais acentuado nas profundidades maiores que 160 cm, onde excedem 50% da assembleia. Nas camadas superficiais do P1, há uma predominância dos morfotipos da subfamília Bambusoideae, especialmente o tipo SADDLE COLAPSED, conforme Montti *et al.* (2009), com uma tendência de redução em profundidade. Morfotipos das subfamílias de gramíneas Panicooideae (tipo BILOBATE) e Chloridoideae (tipo SADDLE) também seguem essa tendência, embora em menor proporção. Em contraste, os fitólitos sem significado taxonômico, produzidos por Poaceae (morfotipos ELONGATE e BULLIFORM FLABELLATE), aumentam em profundidade. Fitólitos de Pooid (tipo RONDEL) e Arecaceae (tipo SPHEROID ECHINATE) são raros, representando apenas 2,75% e 3,35% da assembleia, respectivamente.

Por outro lado, o perfil P2, localizado sob um saueiro, mostra um predomínio ainda maior de fitólitos de Eudicotiledôneas ao longo de sua extensão, com uma média de 56% da assembleia (Figura 22). Esse valor varia de um mínimo de 38% (na camada do formigueiro entre 10-20 cm) a um máximo de 72% (entre 30-40 cm). Os morfotipos SADDLE COLAPSED da subfamília Bambusoideae estão presentes em todo o perfil, com maior frequência nas camadas superficiais e uma redução significativa em profundidade, exceto por um aumento sutil após os 180 cm. As células curtas de gramíneas produzidas pelas subfamílias Panicooideae (BILOBATE e CROSS) e Chloridoideae (SADDLE) são mais frequentes na superfície, diminuem no horizonte Bw3, e voltam a aumentar após os 180cm de profundidade. Os morfotipos de Arecaceae que ocorrem na superfície, especialmente nas amostras do formigueiro, refletem a presença da palmeira Gerivá (*Syagrus romanzoffiana*) na floresta adjacente. Fitólitos de Poaceae sem significado taxonômico em nível de subfamília, mostram uma distribuição regular ao longo do perfil, representando, em média, 23% da assembleia em cada camada.

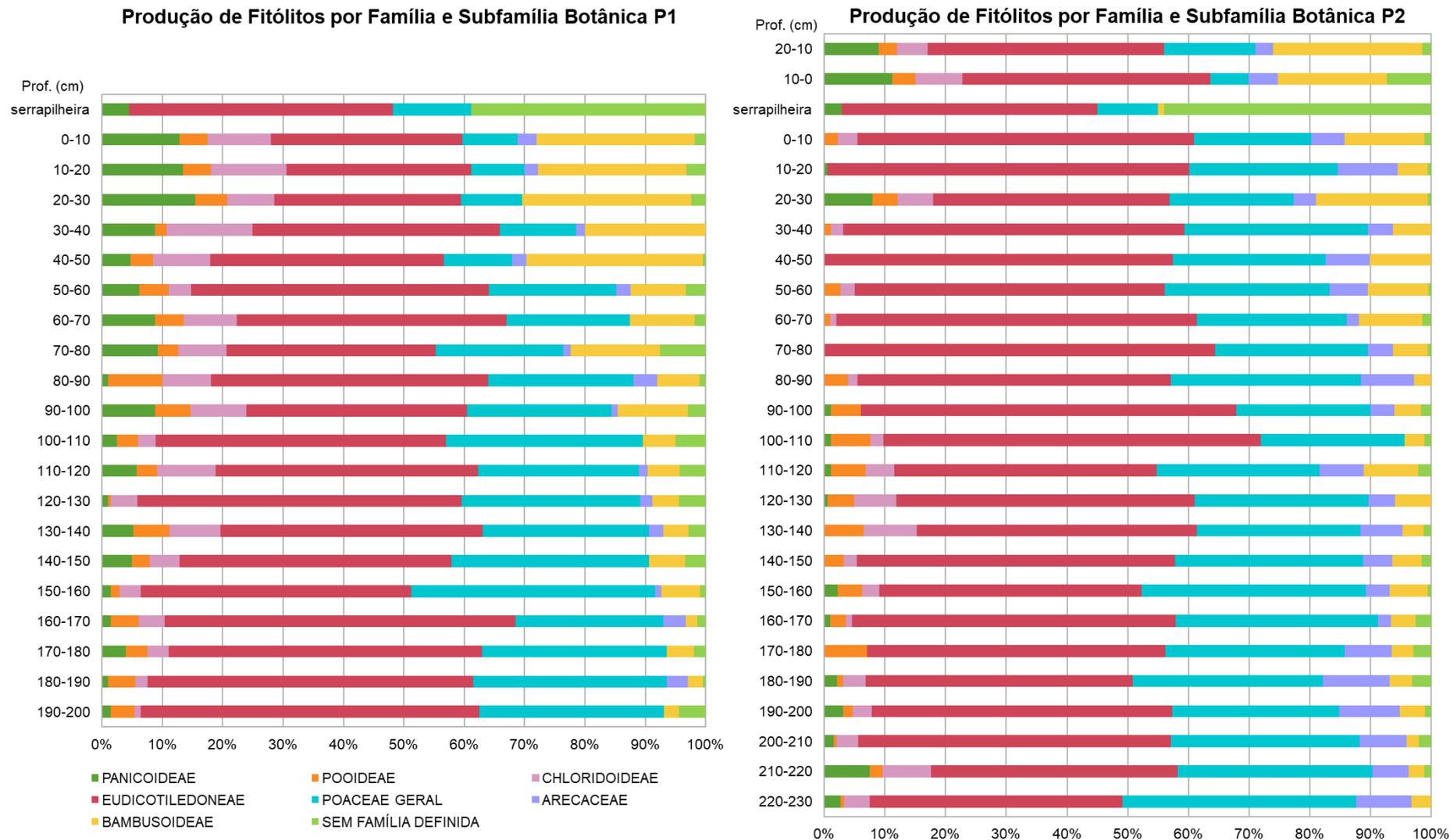


Figura 22: Composição da assembleia fitolítica em P1 e P2 por família e subfamília de plantas. Fonte: Autora.

No perfil P1, observou-se um aumento na quantidade de fitólitos tafonomizados com a profundidade, especialmente aqueles com sinais de corrosão (Figura 23). O índice de tafonomização variou entre 0,1 na serrapilheira, 0,25 em superfície a 0,38 na base do perfil, sendo em média de 0,73. Destacaram-se as profundidades de 100 e 130cm, que apresentam picos de aumento dessa classe (1,26 e 2,13 respectivamente), que pode ser explicada por possível revolvimento do solo, por faunopedoturbação pretérita, mobilizando materiais do perfil, cujas feições estão pouco evidentes no perfil (Figura 24). Esse aumento é mais pronunciado em 160cm, quando atinge 2,30 e se mantém acima de 0,35 até a base do perfil. A proporção de fitólitos corroídos e quebrados, tanto identificados quanto não identificados, é particularmente elevada nos horizontes Bw2 e Bw3. Isso sugere um maior tempo de residência dos fitólitos no solo, submetendo-os a vários processos pedogenéticos físicos e geoquímicos.

Em contraste, a taxa de fitólitos tafonomizados no perfil P2 é maior em comparação ao P1, sendo 2,20 no topo do formigueiro, 2,44 na camada de 0-10cm e 0,58 na base do perfil, sendo a média do perfil (sem o topo do formigueiro) de 1,19. No P2, os fitólitos tafonomizados identificados representam 43,1% da assembleia, enquanto no P1 essa proporção é de 31,7%. Os horizontes Bw3 e Bw4 do P2 apresentam as maiores frequências de fitólitos tafonomizados não identificados, com uma distribuição mais irregular e errática em comparação ao P1. Enquanto o P1 mostra um aumento mais linear dos fitólitos tafonomizados com a profundidade, o P2 exibe uma distribuição menos consistente, com picos e variações significativas.

Quanto ao aspecto tafonômico predominante nos morfotipos, verifica-se que a corrosão ocorre com maior frequência nos morfotipos mais robustos como BLOCKY e TABULARES enquanto as células curtas apresentaram como principal aspecto tafonômico a quebra (Figuras 25 e 26).

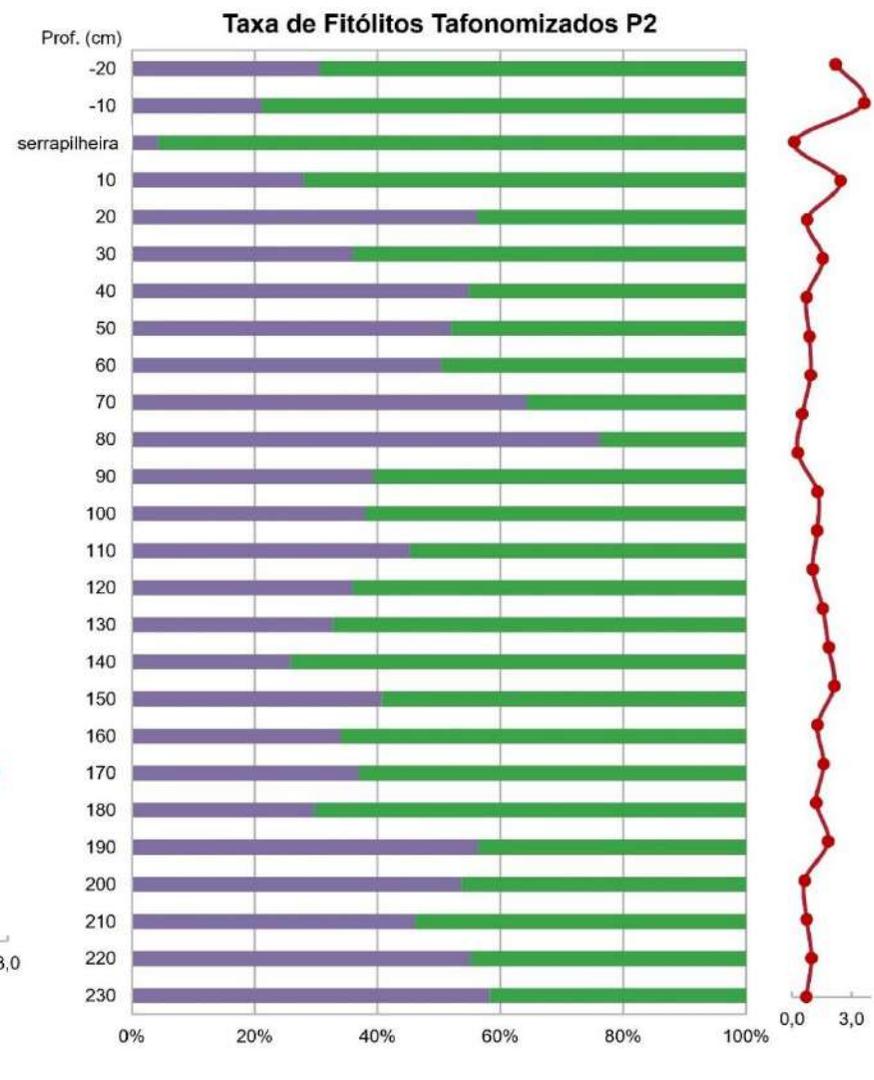
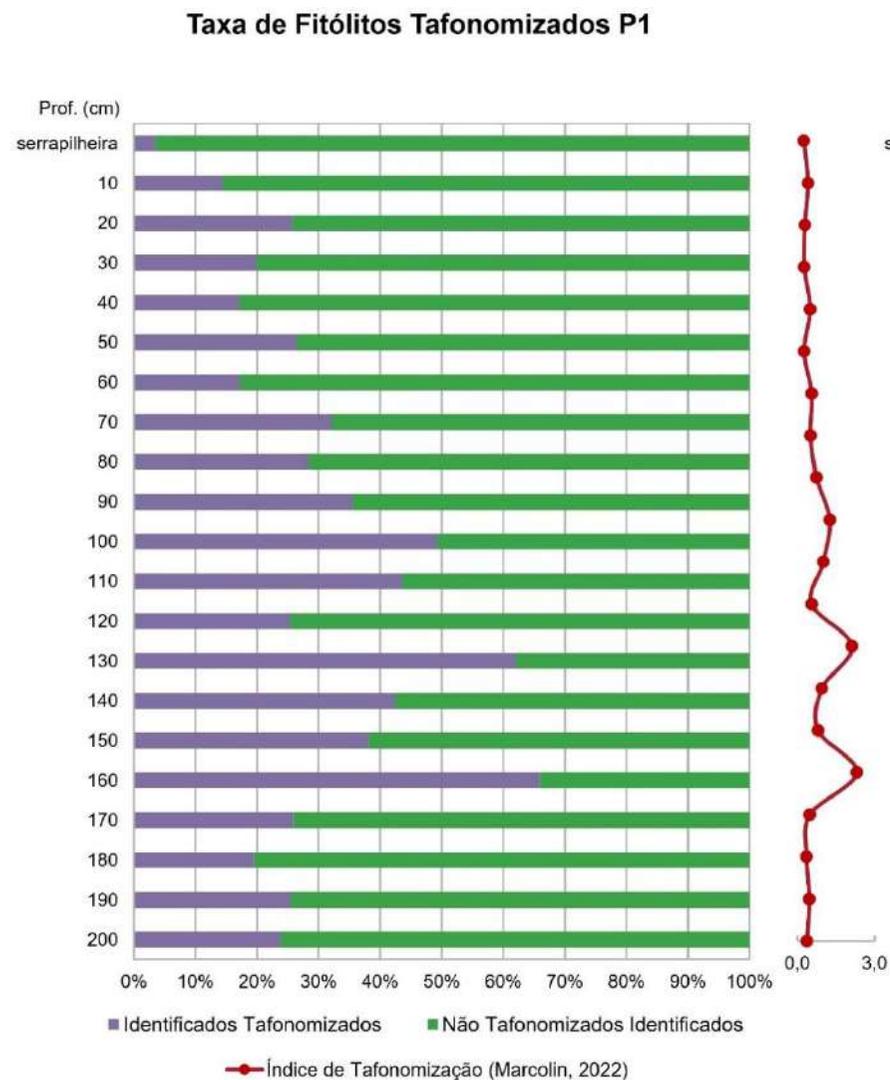


Figura 23: Taxa de fitólitos tafonomizados em P1 e P2. Fonte: Autora.



Figura 24: Galerias com preenchimentos ao longo do P2. Fonte: Autora.

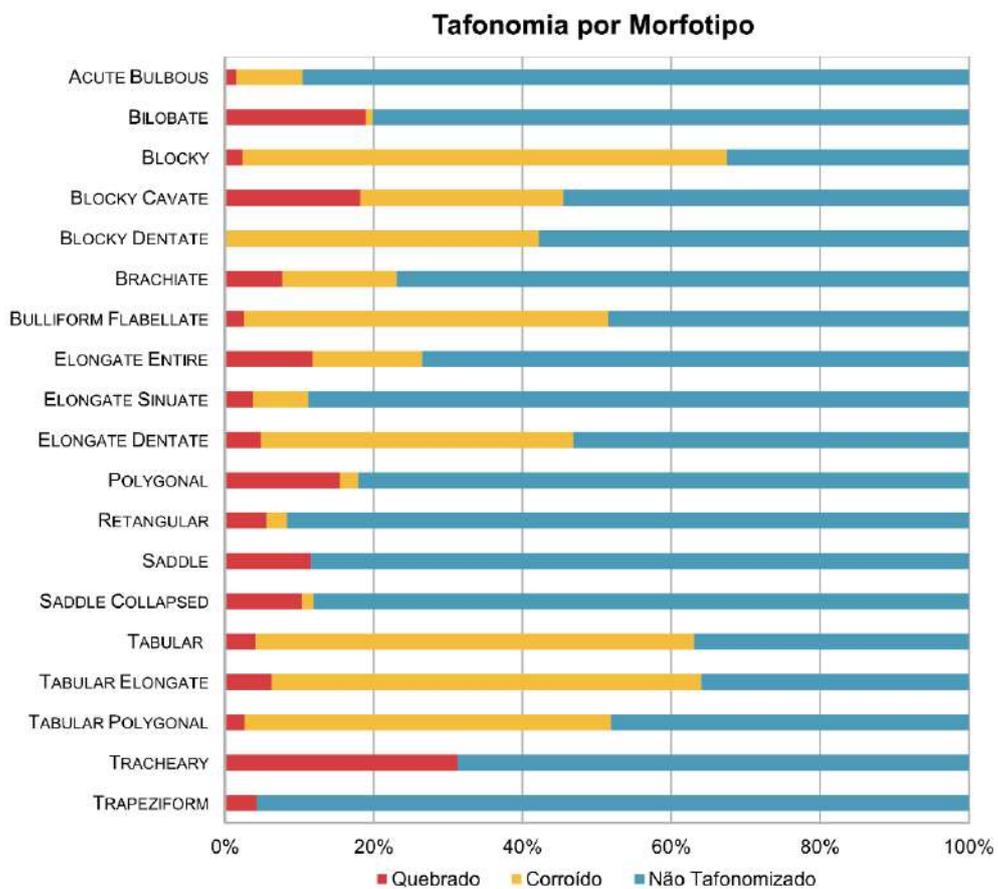


Figura 25: Tafonomia por Morfotipo de fitólito (quebra e corrosão). Fonte: Autora.

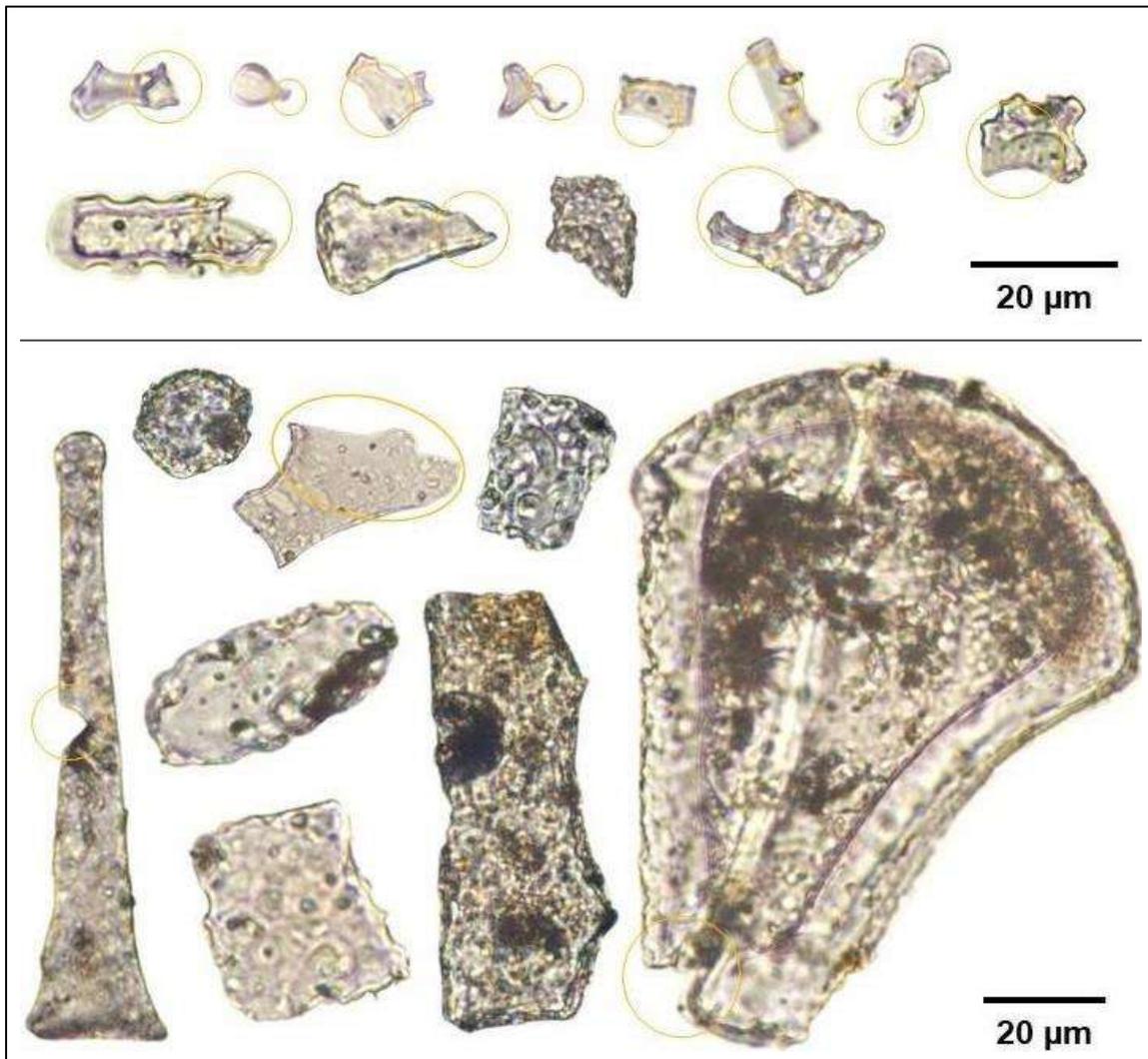


Figura 26: Exemplos de Fitólitos Tafonomizados– corroídos e/ou quebrados. Círculos amarelos destacam as quebras. Fonte: Autora.

4.5.3. Efeito da atividade do saueiro na assembleia de fitólitos

A Figura 27 apresenta a abundância relativa dos grupos de fitólitos das assembleias identificadas nos perfis, topo do formigueiro, painéis e canais do formigueiro e da serrapilheira. Os fitólitos de Poaceae predominam nas amostras do formigueiro e do P1. Os fitólitos de Eudicotiledoneas predominam no P2 e se assemelham as amostras das painéis e canais e da serrapilheira. As Arecaceae ocorrem no topo do formigueiro e no topo do P1. Os fitólitos sem família definida predominam nas amostras de serrapilheira e secundariamente nas amostras de painéis e canais.

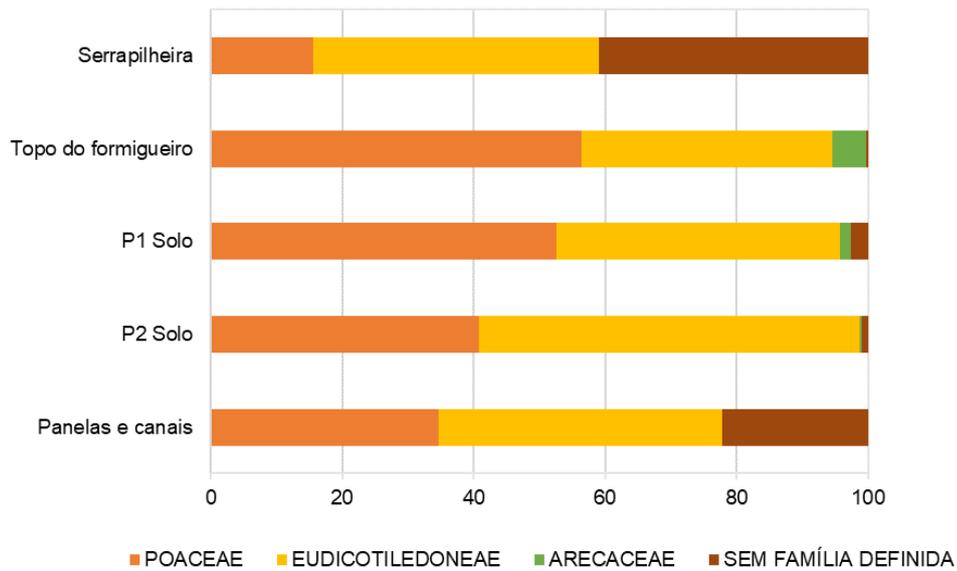


Figura 27: Grupos taxonômicos presentes na assembleia de fitólitos. Fonte: Autora.

Os dados dessas assembleias foram submetidos a análise de componentes principais visando avaliar o efeito da ação da colônia de formigas sobre a distribuição e preservação dos fitólitos nos perfis.

A análise dos resultados revelou uma tendência de separação em quatro grupos (Figura 28). O modelo que melhor explica as variâncias entre as amostras é aquele composto pelas três primeiras componentes que responde por 47,7% da variância.

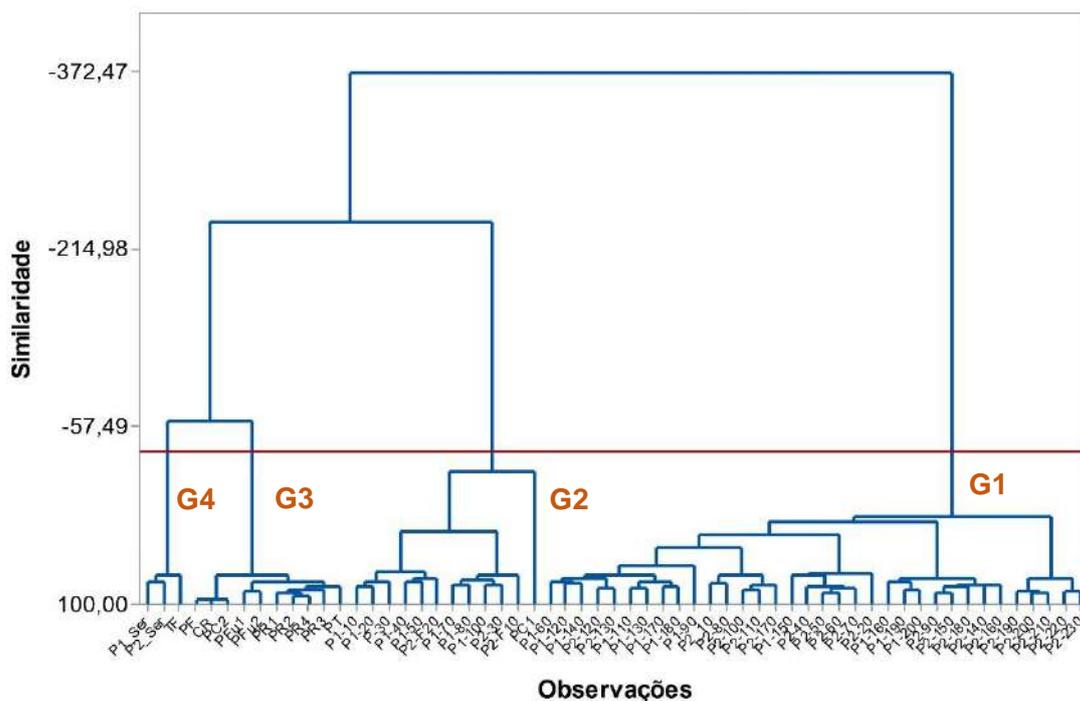


Figura 28: Agrupamentos de amostras conforme semelhanças na assembleia fitolítica. Fonte: Autora.

O Grupo 1 (G1) reúne todas as amostras do P2 e as amostras 60 e 90cm de P1 e demais as amostras entre 110 e 200cm do P1. Esse grupo se caracteriza por uma assembleia composta predominantemente por uma assembleia de fitólitos de baixo significado taxonômico (ELONGATE e TABULARES), alta frequência de BULLIFORMES (Poaceae) e SPHEROIDS ORNATE e PSILATE (Eudicotiledoneae).

O Grupo 2 (G2) reúne as amostras do topo do formigueiro do P2 e as amostras coletadas no P1 até 100cm com exceção das amostras a 60 e 90cm. Esse conjunto de amostras apresentam uma assembleia com maior contribuição de fitólitos de monocotiledôneas.

O Grupo 3 (G3) reúne as amostras dos canais e painéis do formigueiro com exceção da amostra preenchimento de canal PC1 (90-100cm). Esse grupo é o que apresenta uma assembleia composta por fitólitos lábeis de material fresco (*labile pool* – Stromberg) (ESTOMATE, TRACHEID, AMEBOID e ACUTE), encontrados em articulados de sílica e em células simples.

O Grupo 4 (G4) é composta pela amostra TF, Topo do Formigueiro, coletada em superfície no entorno do P2 e as amostras de serrapilheira do P1 e P2.

O modelo que melhor explica os agrupamentos é aquele definido pela PCA eixo 1 e eixo 2 (Figura 29). A PCA eixo 1 indica que 20,8% da variância total entre as amostras são definidas pelas variáveis: TRAPEZOID, BULLIFORM FLABELATTE e SPHEROID ORNATE (no quadrante positivo); e ACUTE BULBOUS, AMEBOIDAL, ESTOMATE e TRACHEID (no campo negativo). Esse eixo representa a influência do processo de diagênese na formação do perfil fitolítico e diferencia o G1 e o G2 dos demais grupos. A PCA eixo 2 (16,6% da variância) é definida pelas variáveis TABULAR, TABULAR ELONGATE, TABULAR POLIGONAL, ELONGATE SINUATE, ELIPSOIDAL PSILATE e BULLIFORM FLABELATE (quadrante positivo); e por BILOBATE BLOCK DENTATE, SADDLE, SADDLE COLLAPSED, e RONDEL (quadrante negativo). Essa assembleia mais diversa, composta por células curtas de gramíneas e células longas sem significado taxonômico representa o efeito da bioturbação no solo, promovendo mais mistura.

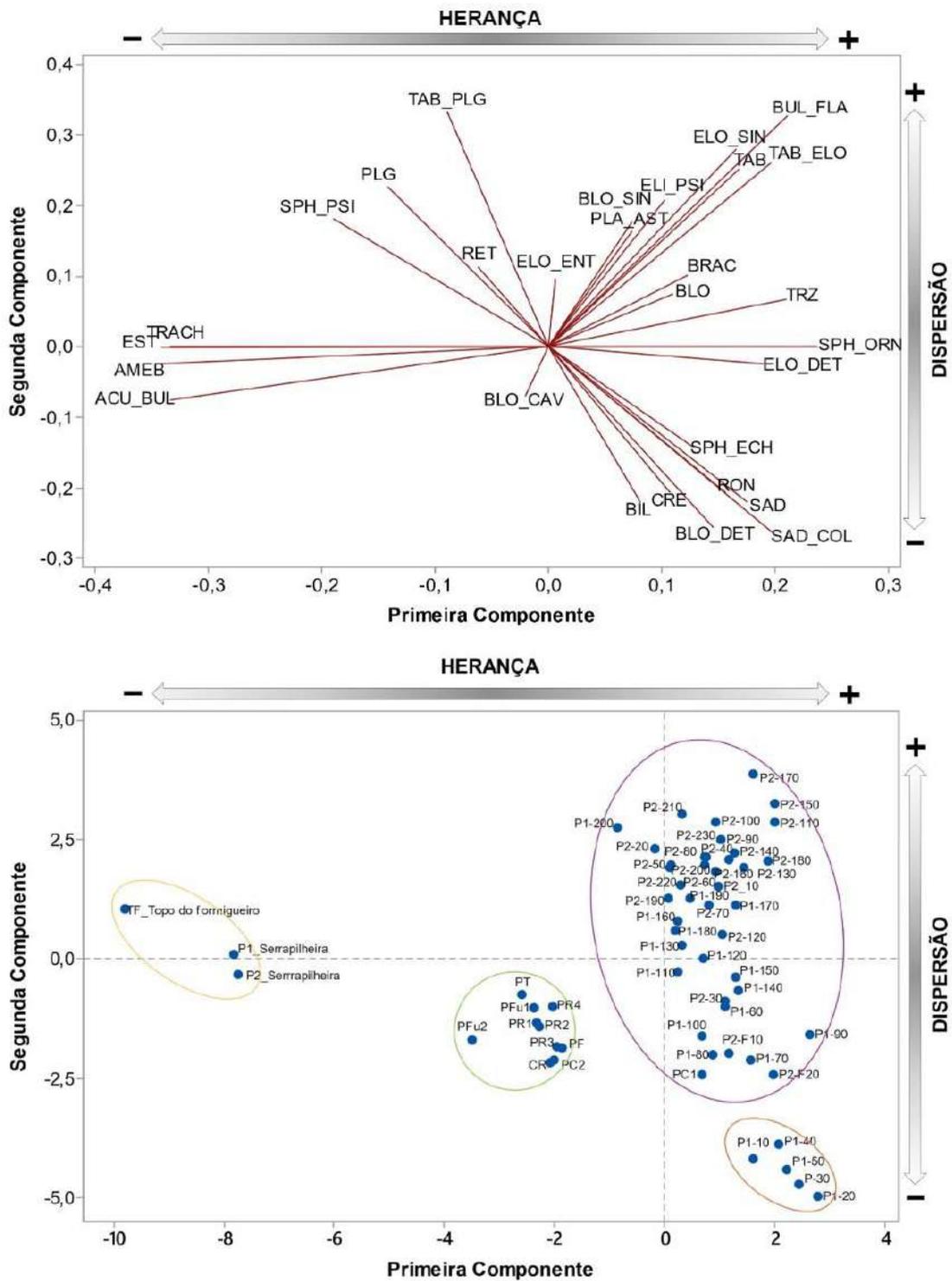


Figura 29: Relação dos morfotipos de fitólitos e agrupamentos das amostras (P1, P2, materiais do formigueiro e serrapilheira) em relação ao fenômeno de herança e o processo de dispersão.

TF: Topo do formigueiro; PC: Preenchimento de canal; CR: Canal com resíduos; PF: Panela de folhas; PT: Panela de terra; PFu: Panela de fungos; TPFu: Terra da panela de fungos; PR: Panela de resíduos; TPR: Terra da panela de resíduos. Fonte: Autora.

Visando obter uma análise mais refinada, uma nova análise de componentes principais foi realizada utilizando os dados da assembleia fitolítica, isótopos de C (c-13), COT, relação C/N e a quantidade de microcarvões quantificada nas amostras³. A análise dos resultados demonstra uma melhora na explicação dos agrupamentos, em que as três primeiras componentes respondem por 61% da variância total entre os dados analisados (Figura 30).

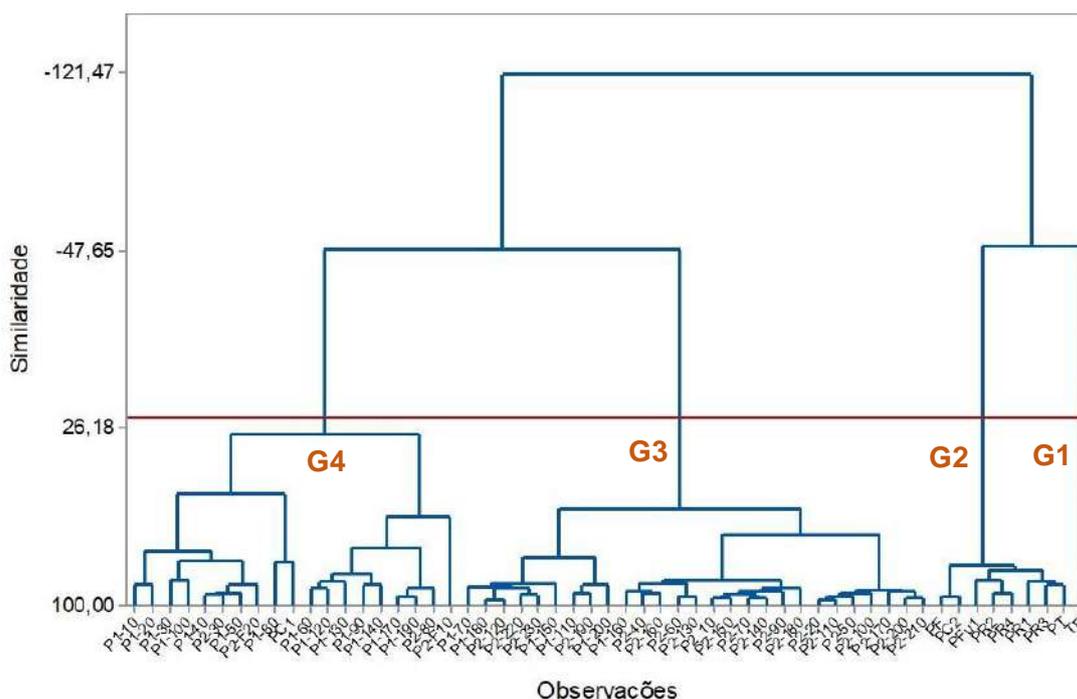


Figura 30: Agrupamentos de amostras conforme semelhanças entre os dados da análise multiproxy. Fonte: Autora.

O Grupo 1 (G1) corresponde apenas a amostra do material do topo do formigueiro no P2 (TF)⁴.

O Grupo 2 (G2) corresponde as amostras do material do formigueiro a exceção da PC1 (Figura 31).

O Grupo 3 (G3) reúne a maioria das amostras do P2 e as amostras 70, 110, 150, 160, 180 e 200 da base do P1.

O Grupo 4 (G4) coaduna as amostras do P1 até 100cm; as amostras do topo do formigueiro (P2-F20 e P2-F10), as amostras 30 e 80cm do P2 e a PC1.

³As amostras de serrapilheira não foram consideradas nesta análise, por não conterem dados de todas as variáveis.

⁴ A amostra TF não consta na Fig. 32 por não ter os microcarvões quantificados.

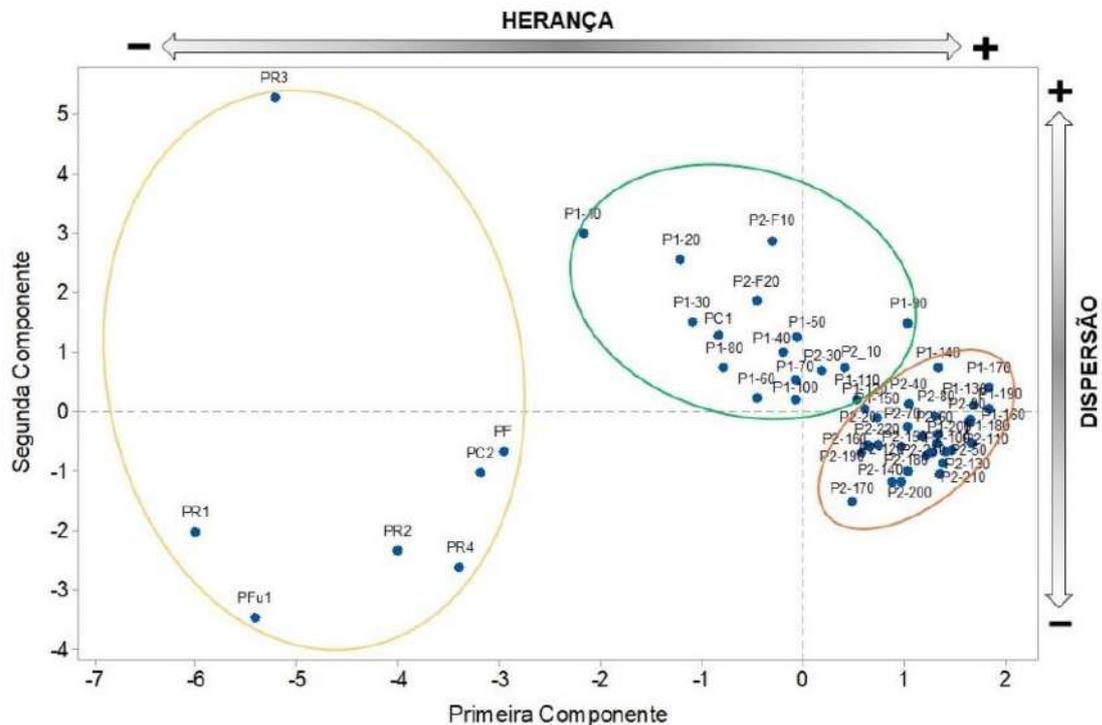


Figura 31: Agrupamentos das amostras de P1, P2 e materiais do formigueiro.

PC: Preenchimento de canal; CR: Canal com resíduos; PF: Panela de folhas; PT: Panela de terra; PFu: Panela de fungos; TPFu: Terra da panela de fungos; PR: Panela de resíduos; TPR: Terra da panela de resíduos. Fonte: Autora.

Na PCA eixo 1, 31,4% da variância total entre as amostras são definidas pelas variáveis: Eudicotiledoneae, C13 e microcarvões (no quadrante positivo); e a formas sem significado taxonômico (AMEBOIDAL e ESTOMATE) e COT (no campo negativo) (Figura 32). Esse eixo, assim como na análise anterior, também reflete a influência da diagênese na formação do perfil fitolítico e diferencia o G1 dos demais. A PCA eixo 2 (17,5% da variância) é definida pelas variáveis Poaceae, Arecaceae, relação C/N e COT (quadrante positivo); e por estômatos e 13C (quadrante negativo). Esse eixo separa os grupos 2 e 3, sendo o quadrante positivo aquele que individualiza as amostras superficiais do P1 (até 140cm), e o quadrante negativo as demais amostras.

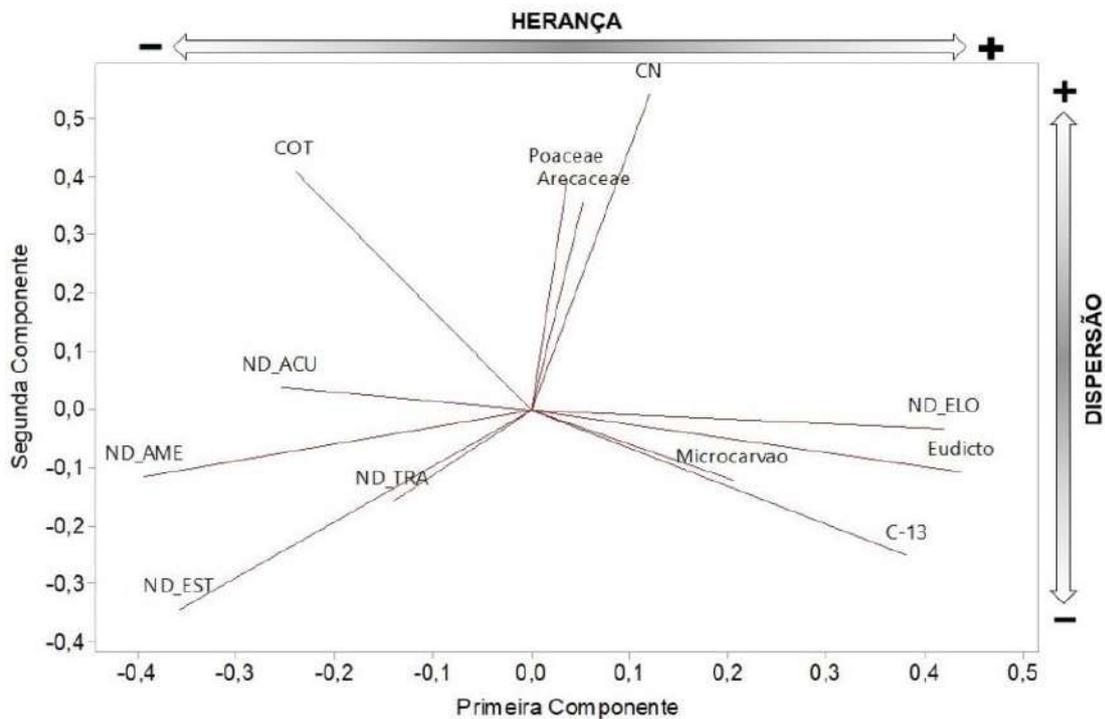


Figura 32: Relação das variáveis grupo taxonômico, isótopos ^{13}C , COT, relação C/N, microcarvões e morfotipos sem família definida. Fonte: Autora.

Também foi realizada uma análise com base nos dados da assembleia fitolítica de P1 e P2, considerando as subfamílias de Poaceae, a família Arecaceae e o grupo de plantas Eudicotiledoneae (Figura 33). De acordo com os resultados, observa-se que as quatro primeiras componentes permitem interpretar tanto a variação das condições do ambiente (umidade e temperatura) quanto a ação da atividade das formigas nos perfis.

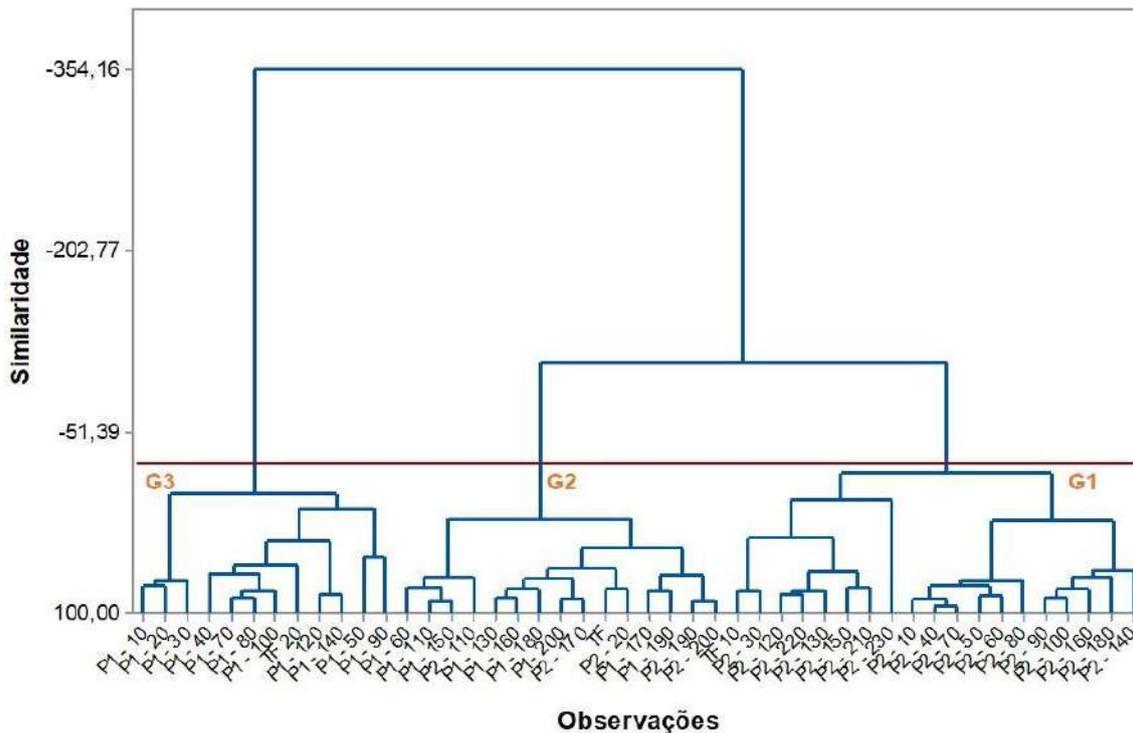


Figura 33: Agrupamentos de amostras conforme semelhanças entre os dados das assembleias de fitólitos de P1 e P2. Fonte: Autora.

O Grupo 1 (G1) reúne amostras em profundidades diferentes de P2.

O Grupo 2 (G2) reúne as amostras mais profundas de ambos os perfis, abaixo de 110cm para P1 e de 170cm para P2 e as amostras do Topo do Formigueiro (TF).

O Grupo 3 (G3) reúne as amostras do P1 até 140cm.

As PCAs eixos 1 e 2 expressam as variações de umidade e temperatura, respectivamente e juntas respondem por 68,9% da similaridade entre as amostras. A PCA eixos 3 e 4 respondem por 89,4% da variabilidade entre as amostras e representam a variação das características de herança e a dispersão da assembleia de fitólitos, respectivamente.

O campo positivo da PCA eixo 1 é explicado pela maior contribuição de morfotipos de Poaceae, indicativos de menor umidade no ambiente (Figuras 34 e 35). No campo negativo, destaca-se os morfotipos do grupo de Eudicotiledoneae, assinalando maior umidade no ambiente. A PCA eixo 2, destaca-se no campo positivo pela presença de fitólitos da subfamília de gramíneas Poideae, assinalando temperaturas mais baixas que as atuais no ambiente. No campo negativo da PCA eixo 2, destaca-se a presença de fitólitos de Arecaceae e da subfamília Panicoideae, assinalando ambiente quente.

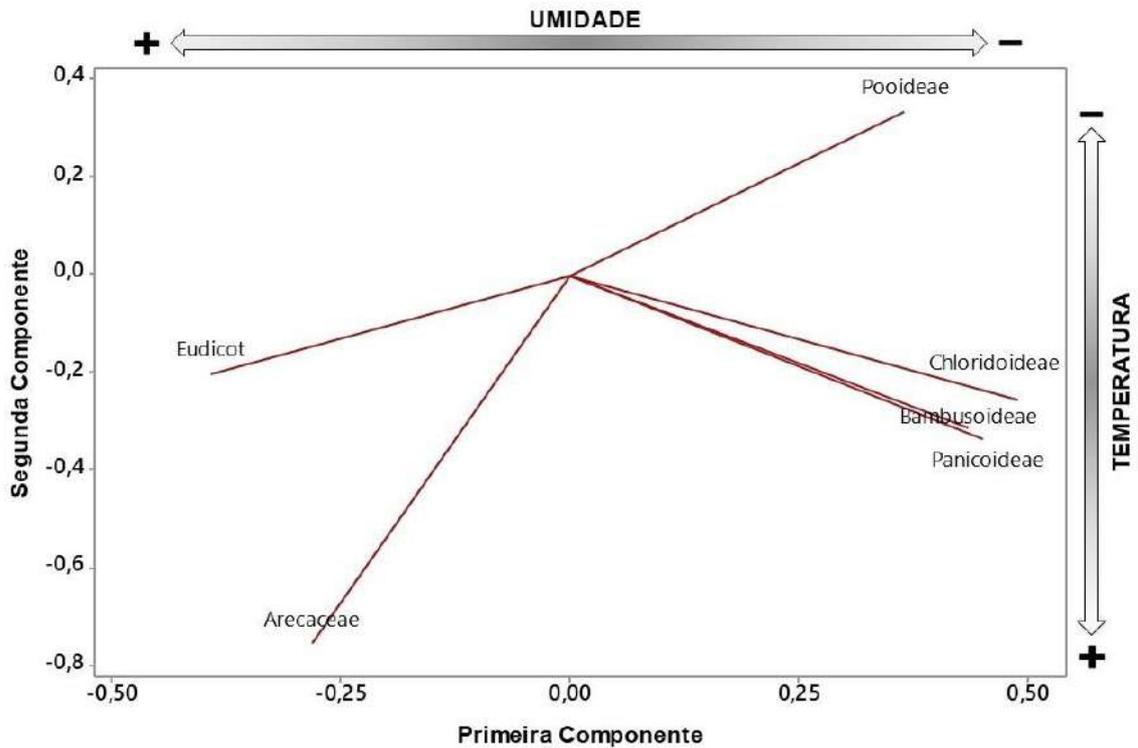


Figura 34: Relação famílias e subfamílias de plantas identificadas na assembleia fitolítica de P1 e P2. Fonte: Autora.

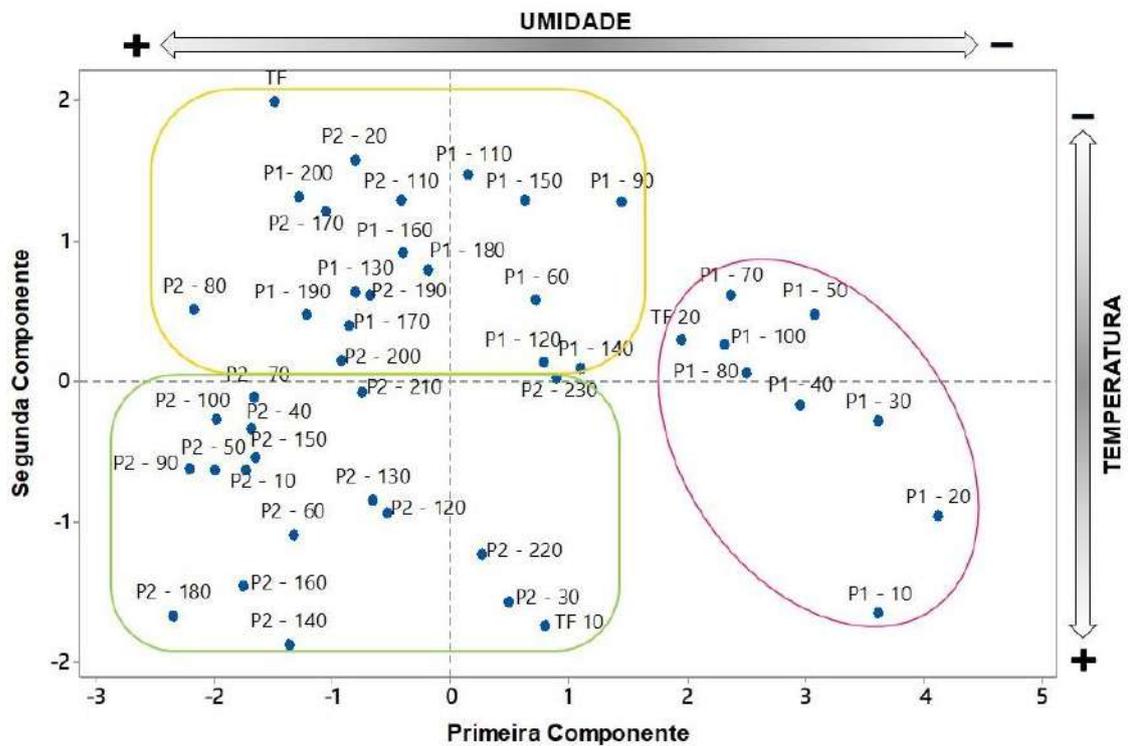


Figura 35: Agrupamentos das amostras de P1, P2 e topo do formigueiro. Fonte: Autora.

Ao analisar os resultados das componentes principais eixo 3 e 4, observou-se que elas explicam o efeito da atividade das formigas no perfil. A

PCA eixo 3 no campo negativo, tem maior expressão das Panicoideae e Bambusoideae, sendo esta última subfamília de plantas invasoras na vegetação moderna. No campo positivo, destaca-se a presença de Pooideae e Eudicotiledoneae. Considerando que as Pooideae não são encontradas na vegetação atual, assim como as Bambusoideae, que são invasoras atuais, interpretou-se este eixo como relacionado ao grau de preservação da assembleia de fitólitos no solo (herança da trajetória da vegetação no local). A PCA eixo 4 é caracterizada no campo negativo pelos fitólitos de Eudicotiledoneae e Panicoideae, representativos da vegetação atual, e no campo positivo, ocorre a presença de Arecaceae e Pooideae. Este eixo explica melhor o G3, que apresenta mistura de amostras de diferentes profundidades e pode estar relacionado com a atividade de formigas no perfil.

4.4 Zonas Fitolíticas

As zonas fitolíticas de ambos os perfis são descritas e analisadas a seguir. A análise de agrupamento hierárquico, permitiu identificar estatisticamente 3 zonas fitolíticas em ambos os perfis. Essas zonas assinalam mudanças na composição das assembleias, em respostas a momentos ambientais distintos.

No P1 a assembleia fitolítica da vegetação atual é representada pelas amostras de serrapilheira e 0-10cm e caracteriza o fragmento de mata plantada na área, que contém espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual que recobria a região. Nessas amostras destaca-se a presença abundante de morfotipos da família Bambusoideae (SADDLE COLLAPSED), de Eudicotiledonea lenhosas (SPHEROID ORNATE e SPHEROID PSILATE) e de gramíneas (BILOBATE e SADDLE). Destaca-se também a presença de estômatos, traqueias e pelos associados ao material mais fresco da serrapilheira (Figura 36).

As zonas fitolíticas identificadas são:

Zona I (~6802 – 6508 anos cal AP⁵): corresponde ao horizonte Bw4 Bw3 e a base do Bw2 (200 – 170 cm de profundidade). Esta zona apresenta assembleia de fitólitos com predomínio de Eudicotiledoneae e Poaceae. A alta frequências dos morfotipos de fitólitos dos morfotipos BLOCKY, BULLIFORM FLABELATE e ELONGATE ENTIRE indica a coexistência de gramíneas e plantas arbustivas e arbóreas (morfotipos TABULAR) no ambiente, Os valores médios dos índices D/P, Iph e Fs, respectivamente, 1,18, 59,7% e 2 sugerem a existência de uma vegetação aberta com gramíneas C₄. Os valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$, em média 17,7‰, corroboram essa interpretação e sugerem a presença de uma vegetação de cerrado.

Zona II (~6508 – 2725 anos cal AP): abrange os horizontes Bw3 e a base do Bw2 (170 – 60cm de profundidade). De acordo com os agrupamentos estatísticos, esta zona foi subdividida em duas subzonas:

Zona IIa (~6357 – 5821 anos cal AP): relativa ao horizonte Bw2 (170 – 100cm de profundidade), é caracterizada pela alta frequência de morfotipos de Poaceae em geral e um incremento de fitólitos de Eudicotiledoneae, e das

⁵ Idades obtidas pelo modelo de idade ¹⁴C (APÊNDICE E).

subfamílias Panicoid (BILOBATE, TRAPEZIFORM) e Bambusoid (SADDLE COLLALPSED). Este momento ambiental reflete uma vegetação mista, com maior participação de plantas C₄ na base desta zona, adaptada a condições mais secas, com valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ entre -16,8‰ e -19,9‰. O topo desta zona apresenta melhora nas condições de umidade refletida em uma vegetação mista com maior participação de plantas C₃ (>40%).

Zona IIb (~5821 – 2792 anos cal. AP; 100 – 60cm de profundidade): verifica-se um ambiente com mais umidade disponível em comparação as zonas subjacentes. Apresenta valores de índices Fs: 0,60 e Ic:28,7, e um expressivo aumento dos fitólitos de Eudicotiledoneae em detrimento dos fitólitos de Poaceae geral. Entretanto, destaca-se o aumento de fitólitos da subfamília de gramíneas Panicoidae (C₄, adaptada a condição de clima quente e úmido), corroborando a melhora de umidade no ambiente, também registrada pelo empobrecimento isotópico da MOS, que apresenta valor $\delta^{13}\text{C}$ médio de 20,5‰.

Zona III (~2792 anos cal AP – atual): agrupa os horizontes A, AB e Bw1 (60 – 0cm). Essa zona se destaca por apresentar aumento de fitólitos Bambusoid, Chloridoideae (SADDLE) e Panicoid (BILOBATE, CRENATE, TRAPEZIFORM) em detrimento da quantidade de fitólitos de Poaceae geral. Observa-se também o aumento de fitólitos marcadores de floresta como SPHEROID PSILATE e SPHEROID ORNATE, TABULAR e TABULAR ELONGATE (Eudicotiledoneae). O Ic médio de 19,42 e os valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ de -23,7 refletem um ambiente de vegetação mista, com predomínio de plantas C₃, adaptadas a condições quentes, semelhantes as atuais.

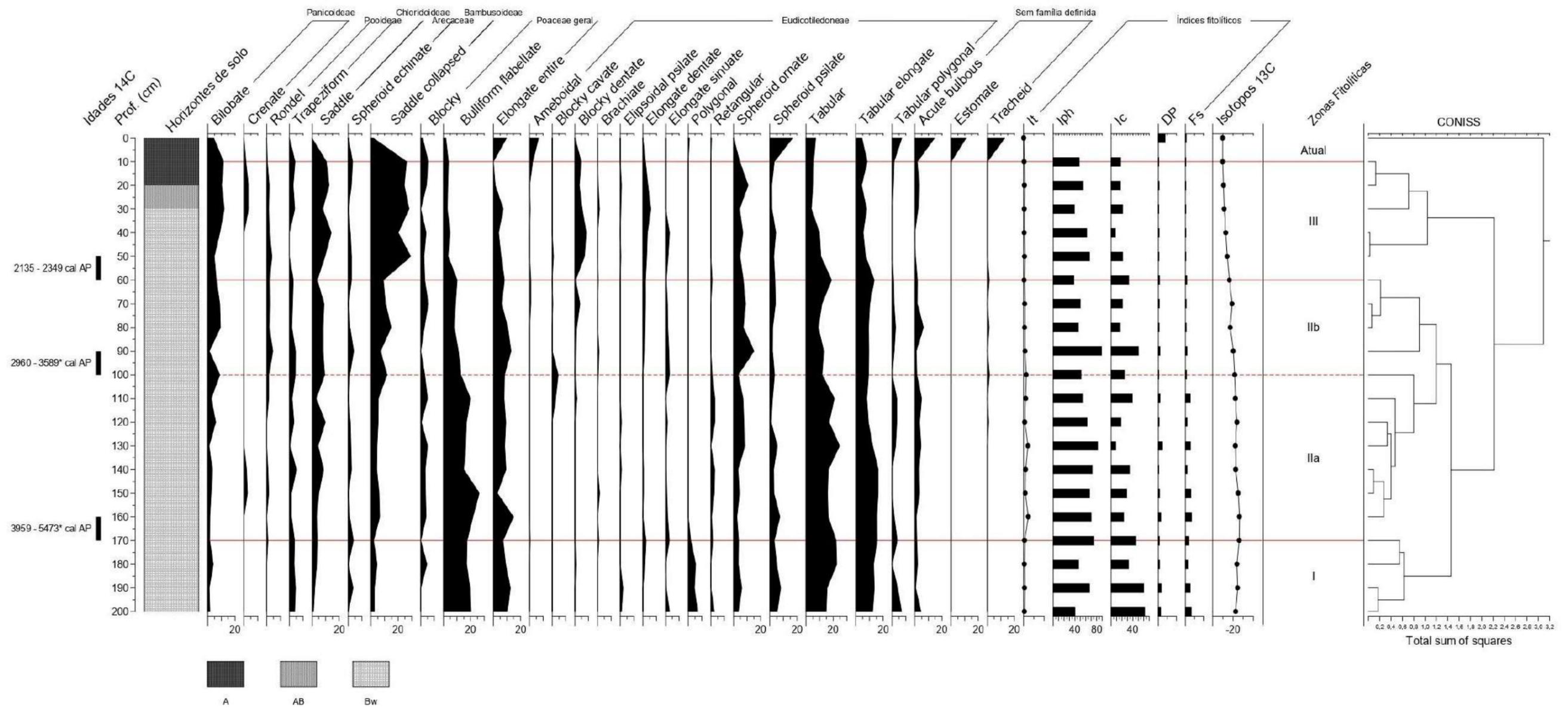


Figura 36: Frequência relativa da assembleia de fitólitos, índices fitolíticos e isotópicos do P1. Fonte: Autora.

Perfil 2:

Este perfil foi subdividido em três zonas que refletem momentos ambientais distintos (Figura 37):

Zona I (~7082 – 6698 anos cal AP): Esta zona, representando o horizonte Bw4 (230 – 190 cm), mostra predominância de Eudicotiledoneae e Poaceae além da ocorrência de Arecaceae. Os índices lph (60,3) e Fs (2,3) indicam um ambiente aberto, composto predominantemente por plantas C₄. Essa interpretação é corroborada pelo valor isotópico de 19,4‰.

Zona II (~6698 – 5347 anos cal AP; 190 – 90cm de profundidade): agrupa os horizontes Bw4, Bw3 e a base do Bw2. É caracterizada por um aumento da presença de morfotipos de Eudicotiledoneae e manutenção da quantidade das células de Poaceae geral em comparação a zona subjacente. Observa-se aumento de células de fitólitos de Chloridoideae O índice D/P de 0,79, e os valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ de -18,5‰ sugerem uma vegetação mista, uma transição para um ambiente mais úmido e menos estressante.

Zona IIIa (~5347 – 3436 anos cal AP; 90 – 70cm de profundidade): Corresponde ao horizonte Bw1. Verifica-se um aumento de fitólitos de Bambusoideae e o protagonismo Eudicotiledoneae SPHEROID ORNATE e TABULARES.

Zona IIIb (~3436 anos cal AP - atual; 70 – 10cm de profundidade): Representa os horizontes A, AB e Bw1. A produção de BULLIFORM FLABELATE e outros morfotipos de Poaceae é mais uniforme e presente nesses horizontes. Ao contrário do P1, os fitólitos de Chloridoid (SADDLE) aparecem em menor quantidade. Os valores de D/P e isótopos $\delta^{13}\text{C}$, 1,4 e -21,99‰ sugerem maior umidade e predominância de plantas C₃.

O topo do formigueiro apresenta-se semelhante a Zona IIIb, destacam-se os morfotipos BILOBATE, SADDLE, SADDLE COLLAPSED, SPHEROID ORNATE, TABULAR, TABULAR ELONGATE e morfotipos sem família definida.

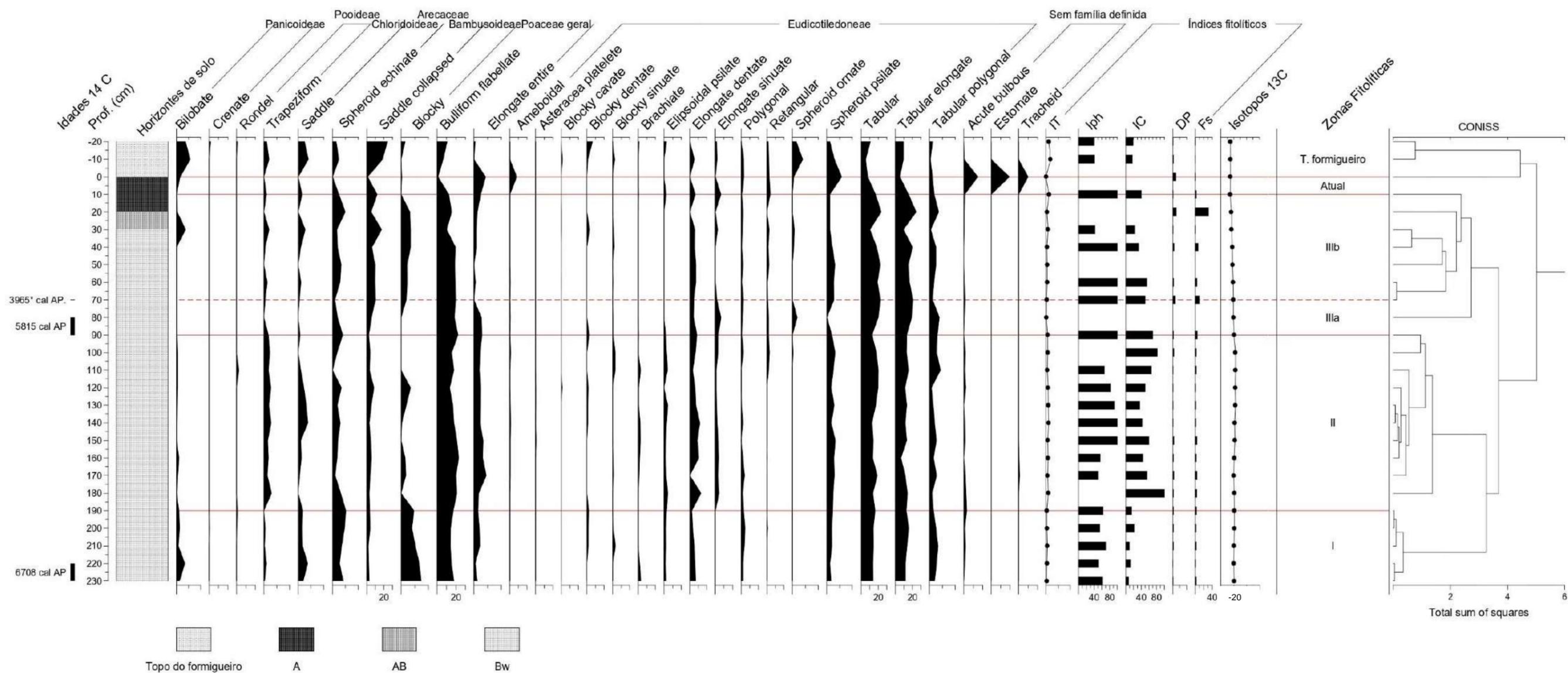


Figura 37: Frequência relativa da assembleia de fitólitos, índices fitolíticos e isotópicos do P2. Fonte: Autora.

5. DISCUSSÃO

5.1 O solo como reservatório de fitólitos

Os solos estudados apresentam atributos típicos daqueles da região oeste do Paraná (EMBRAPA, 1984; Marcolin; Calegari, 2020; Silva, 2021; Silva *et al.* 2021). Os elevados teores de argila e as cores avermelhadas estão associadas ao material de origem, os basaltos da Formação Serra Geral, Membro Toledo, (Arioli; Licht, 2013; Licht; Arioli, 2018). A relação silte/argila <2 , obtida nos horizontes Bw é comum em Latossolos e pode ser explicada por leve lessivagem e elutriação (Moreira; Oliveira, 2008).

A acidez moderada, elevada capacidade de troca catiônica e saturação por bases, além da diminuição do teor de matéria orgânica com a profundidade, são atributos químicos típicos de solos tropicais (Boutton, 1996) e comumente encontrados na região (EMBRAPA, 1984; Silva, 2021; Silva *et al.* 2021). Os valores mais elevados de pH observados no horizonte A do P1 podem ser explicados pela maior oferta de bases e pelo maior conteúdo de matéria orgânica na superfície, associados à recomposição da mata sobrejacente.

Os materiais do formigueiro e das painelas de terra se assemelham física e quimicamente às amostras dos perfis, indicando que a fonte do material transportado pelas formigas é do próprio perfil (movimentação vertical ascendente). Estudos comprovaram a elevada taxa de mobilidade de solo pelas formigas saúvas, translocando o solo da base para o topo do perfil (Moreira *et al.* 2004; Bieber *et al.*, 2011; Leal *et al.*, 2012).

Os elevados valores de P nas painelas de fungos estão associados à natureza do material, que pode conter bactérias fixadoras de nitrogênio, auxiliando na reciclagem de N e P (Pinto-Tomás *et al.*, 2009). Corroborando essa interpretação, observa-se que os valores de nitrogênio total (NT), MOS e COT são mais elevados nas amostras das painelas de cultivo de fungos e de resíduos quando comparados às outras classes de painelas do P2. Esses valores refletem a acumulação de folhas frescas nos “jardins de fungos” do formigueiro, onde ocorre o cultivo de fungos, promovendo maior fixação de N (Pinto-Tomás *et al.*, 2009).

A dessilicização, que é a remoção ou perda de sílica (SiO_2) dos materiais do solo, é um fenômeno comum em regiões tropicais (Price; Velbel, 2003). A diminuição dos valores dos índices geoquímicos em profundidade dos solos estudados, corrobora os dados de Silva (2021), que encontrou uma tendência semelhante em dois perfis de solo em seu estudo realizado na mesma unidade geomórfica da região.

A micromorfologia comprovou a microagregação dos solos estudados. A maioria dos microagregados apresenta-se coalescidos, gerando estruturas granulares e microgranulares em fase com a descrição de campo. As estruturas granulares pequenas ($\leq 0,6$ cm) de horizontes superficiais e os microagregados ovais (<300 μm), observados nos horizontes B latossólicos, (Bw2, Bw3 e Bw4) dos perfis estudados são atribuídas em parte, à atividade das saúvas (Vidal-Torrado; Lepsh, 1999; Miklós, 2012).

Microagregados em Latossolos podem assumir diversas formas devido às ações mecânicas da macrofauna e de processos biogeoquímicos e estão também sujeitos a processos de contração e expansão do solo (Cooper *et al.* 2005).

Os resultados físico-químicos obtidos neste estudo atestam um grau moderado de evolução dos solos estudados, classificados como LATOSSOLO VERMELHO Eutróférrico típico (LVef), em comparação a outros solos de superfícies correlatas (Silva, 2021, Silva *et al.* 2021). Nos perfis estudados não há evidência de aloctonia, conforme também apontado por Silva *et al.* (2021). Assim, entende-se que a pedogênese ocorreu *in situ*, a partir da alteração do basalto subjacente.

5.2 Composição, distribuição e preservação de fitólitos no solo: influências biológicas e implicações na pedogênese

A proporção de FIA recuperada dos solos apresenta baixa correlação com a quantidade de fitólitos por grama de solo. Isto porque a FIA é composta também por microcarvões e fragmentos minerais em proporções variadas. Resultado semelhante foi obtido por Calegari *et al.* (2013) Rodrigues (2018), Marcolin *et al.* (2023) em Latossolos de diferentes regiões do Brasil.

A concentração de fitólitos por grama de solo diminui com a profundidade em ambos os perfis, e apresenta um padrão consistente com o modelo de deposição denominado "herança" (Fredlund; Tieszen, 1994). Segundo esse modelo, a incorporação de fitólitos no solo ocorre a longo prazo, em taxas de acumulação que variam de acordo com a produção das plantas, e a sua permanência no solo depende do tempo médio de residência e das condições edáficas (Fredlund; Tieszen, 1994).

O perfil fitolítico de P1 e P2 parece estar relacionado ao estágio de intemperismo e às propriedades/processos do solo, como acidez moderada, e presença de óxi-hidróxidos de Fe e Al (Bartoli, 1985; Bartoli; Wilding, 1980; Strömberg, 2018). Os óxidos e hidróxidos de Al e Fe, além de refletirem o estágio de evolução do solo, também recobrem as partículas minerais, impedindo a dissolução delas e podem ter o mesmo efeito sobre os fitólitos (Wilding *et al.* 1997; Cornelius *et al.* 2011; Strömberg, 2018). Os solos da região são ricos em óxidos de ferro (Marcolin; Calegari, 2020), sendo a hematita o mais frequente.

O padrão de distribuição dos fitólitos no solo acompanha o perfil de MOS e COT, corroborando o modelo de deposição de fitólitos com o tempo (Fredlund; Tieszen, 1994; Strömberg, 2018). Os teores mais elevados de MOS e COT na parte superficial do solo, refletem o baixo grau de decomposição da matéria orgânica, assim como o maior conteúdo de material orgânico no solo (Parton *et al.* 1987; Calegari *et al.* 2017). As atividades de bioturbação das formigas não levam necessariamente à transformação de nutrientes, mas envolvem a mistura e acumulação de solos de diferentes fontes e horizontes do solo, como observado nesse estudo, e a introdução de materiais orgânicos dentro do saueiro, promove a incorporação de matéria orgânica (Nkem *et al.*, 2000). Isso pode justificar não haver diferenças significativas nos teores de MOS e COT nas amostras de terra das painéis e do formigueiro em relação ao P1.

Os fitólitos tafonomizados aumentam em profundidade e assinalam maior tempo de residência nesses solos, uma vez que não há sinais de coluvionamento ou erosão nos perfis. Neste estudo, o Latossolo apresenta bom desenvolvimento pedogenético e condições moderadas de acidez ($\text{pH} < 7$), que ao longo do tempo pode ter atacado principalmente a superfície de fitólitos de células largas de *Eudicotiledoneae*. Essas células são as mais atacadas pela corrosão na assembleia de ambos os perfis. Esse resultado corrobora estudos que indicam

que morfotipos longos, finos e achatados (menor superfície específica) são mais facilmente dissolvidos em comparação as células curtas de gramíneas (Bartoli; Wilding 1980; Cabanes *et al.* 2011). As células curtas, neste estudo, apresentaram como principal aspecto tafonômico a quebra. Essas quebras, em parte, podem estar relacionadas ao transporte e processamento de material vegetal e solo no interior da colônia pelas saúvas e pela translocação vertical no interior do solo (Osterrieth *et al.* 2009; Cabanes *et al.* 2011), haja visto que os fitólitos de gramíneas são mais abundantes nas amostras basais de ambos os perfis. Destaca-se que na mata próxima ao perfil, fonte do material forrageado pela colônia, as gramíneas são poucas, à exceção dos bambus que ocorrem na borda do fragmento florestal.

A mistura de fitólitos bem preservados e fitólitos tafonomizados, foi estabelecida pelo índice de tafonomização. Valores mais elevados e padrão de distribuição mais irregular foram obtidos com os dados do P2, assinalando maior translocação vertical no perfil. A mobilidade dos fitólitos intraperfil pode ser afetada tanto pela atividade biológica quanto pelas propriedades macromorfológicas do solo (Hart, 2003; Borba-Roschel *et al.* 2006; Piperno, 2006; Liu *et al.* 2019; Marcolin *et al.* 2023). Os atributos de textura e porosidade de P1 e P2, são muito semelhantes e diferem-se apenas pela ação do formigueiro em P2, em função da proximidade dos perfis. Assim, as misturas de materiais, observadas macro e micromorfológicamente no P2, em parte estão associadas a translocação vertical promovida pela macrofauna e a porosidade do solo. A porosidade do solo, de modo geral foi maior a partir de 60cm no P2, onde se nota maior expressão da atividade do formigueiro. Isso indica que a ação da colônia está favorecendo a porosidade do solo, criando macro e micro canais, que podem contribuir para a movimentação descente de fitólitos no perfil.

A boa porosidade do solo e a estrutura microgranular notadas em escala macro e micro nos solos estudados favorecem ao aprisionamento e preservação de fitólitos no interior dos microagregados (Li *et al.*, 2019). Esses resultados corroboram estudos anteriores que apontam os Latossolos como reservatórios favoráveis à incorporação e preservação dos fitólitos (Calegari *et al.*, 2013; Macedo, 2013; Souza *et al.*, 2019; Marcolin *et al.* 2023).

Canais com preenchimento de material mais escuro (do horizonte A), painelas e galerias preenchidas com terra solta observadas entre 60 e 180 cm de

profundidade são expressões da bioturbação no P2. Esses materiais apresentaram quantidades elevadas de fitólitos em diferentes estágios de preservação demonstrando a ação desses animais na construção do perfil fitolítico do solo.

As evidências de bioturbação podem ser observadas até em grandes profundidades na região (Chiapini, 2021; Santos, 2023). Em geral, a bioturbação por formigas pode atingir profundidades superiores a 7 metros, e as evidências destas atividades no solo podem persistir por algumas décadas (Bieber *et al.*, 2011; Leal *et al.*, 2012). As várias gerações de feições de fauna do solo verificadas nas lâminas delgadas (canais e câmaras preenchidos por material microgranular, paredes dos poros com aspecto “picotado” e com certo adensamento, e *pellets* fecais) de ambos os perfis, atestam a preservação do efeito da atividade biológica no solo, contribuindo na estruturação do mesmo e na porosidade (macro e micro), além da incorporação de matéria orgânica no perfil.

5. 3 Efeito das formigas *Atta* no registro fitolítico

A construção do perfil fitolítico do solo, segundo o modelo de herança, é contínua ao longo do tempo (Fredlund; Tieszen, 1994). A incorporação de fitólitos no solo se inicia após a morte da planta, ou de parte dela e da decomposição do tecido vegetal (Piperno, 2006). Esses processos liberam os morfotipos que podem, lentamente, ser incorporados ao solo por meio dos processos pedogenéticos e pela atividade da fauna edáfica (Hart; Humphreys, 1997; Piperno, 2006; Strömberg *et al.*, 2018).

As formigas saúvas, conhecidas pela sua atividade de forrageamento, promovem a incorporação de material vegetal fresco no solo, prática relacionada ao cultivo de fungo (Wilson; Hölldobler, 1978; Zmitrowicz, 2001; Endringer, 2011; Della Lucia, 2011; Miklós, 2012). Nesse processo, fitólitos “frescos” (reservatório lábil) são incorporados ao solo promovendo o “rejuvenescimento” da assembleia fóssil com morfotipos de material vegetal fresco, tal como notado em P2. A presença de restos vegetais com esqueletos de sílica articulados e poucas células simples observados na micromorfologia, comprovam o processo de incorporação de fitólitos frescos no solo.

As diferenças estatísticas notadas na assembleia de fitólitos nos materiais do formigueiro e preenchimentos de canais e entre as amostras de solo dos perfis atestam a movimentação de fitólitos intraperfil, tal como verificado por Hart e Humphreys (1997; 2003). Além disso, a similaridade de assembleia de fitólitos observada entre as amostras do topo do formigueiro do P2, preenchimentos de canais e painelas de terra, corrobora o efeito da colônia no rejuvenescimento da assembleia. Resultado semelhante foi obtido por Hart e Humphreys (1997), que recuperaram fitólitos em material de preenchimento de canais do horizonte B, semelhante a assembleia do horizonte A, assinalando a movimentação vertical de fitólitos no perfil.

As variações estatísticas entre assembleias observadas se devem a presença de restos vegetais nos materiais do formigueiro e a sua assembleia composta por articulados de sílica e morfotipos característicos de material vegetal fresco (AMEBOIDAL, ESTOMATE e TRACHEID), similares aos encontrados na serrapilheira e nos primeiros centímetros do P1, onde não há expressão morfológica de atividade de formigueiros. Isto reflete o processo de incorporação recente de fitólitos no solo, cuja assinatura fitolítica remete a vegetação adjacente (mata replantada).

As diferenças nos materiais do formigueiro do P2 também são evidenciadas pelos resultados isotópicos e químicos, que refletem um maior teor de matéria orgânica, proveniente de plantas C₃, em comparação com o P1 nas mesmas profundidades. A interpretação dos resultados indica que as formigas estão forrageando na floresta adjacente ao formigueiro e incorporando fragmentos dessa vegetação no solo.

A influência das saúvas é percebida claramente nas painelas e canais, no entanto, sua atividade parece não afetar significativamente os valores isotópicos do solo, tampouco a assembleia de fitólitos contida no perfil. Nesse contexto, as painelas e canais podem ser entendidos como *hotspots* biogeoquímicos (Swanson *et al.* 2019) devido a rápida decomposição da matéria orgânica que as formigas coletam e transportam para os ninhos (McKey *et al.*, 2020).

A bioturbação provocada pela macrofauna do solo, incluindo as formigas, resulta em uma mistura eficaz do solo, tanto horizontal quanto vertical. Embora não seja a única via de translocação dentro do perfil, a mistura de materiais promovida pela atividade biológica (bioturbação) desempenha papel central na

formação de solos, sobretudo em regiões tropicais (Kämpf; Curi, 2012). Nesse sentido, o processo de revolvimento que as formigas executam na formação da colônia pode afetar as assembleias de fitólitos no solo, promovendo uma homogeneização das assembleias de fitólitos do solo, reduzindo diferenças que normalmente refletiriam na variação da estrutura da vegetação local ao longo do tempo (Zangerlé *et al.* 2016), implicando na interpretação paleoambiental.

Nesse estudo, apesar dos resultados comprovarem a incorporação e movimentação de fitólitos no P2, não se observou um efeito negativo significativo no perfil fitolítico que comprometesse a interpretação paleoambiental, isso se deve, em parte, ao padrão de movimentação das formigas, que é realizado dentro dos canais do formigueiro, minimizando as possibilidades de remobilização de material em diferentes partes do perfil.

O estudo paleoambiental revelou três momentos ambientais, desde o Holoceno Médio, que se repetem em P1 e P2, configurando as mesmas tendências de mudanças na estrutura da vegetação (Figuras 33 e 34). Em P2, as semelhanças estatísticas intra-perfil da assembleia de fitólitos são menos evidentes que em P1, especialmente após os 100cm, onde ocorre maior expressão da atividade da colônia. No entanto, essas diferenças não alteraram a tendência de mudanças ambientais identificadas, isto é, período mais seco do que o atual no Northgrippiano (Holoceno Médio). Destaca-se, contudo, a baixa frequência de células curtas de gramíneas nos primeiros 100cm desse perfil e nos materiais do formigueiro em comparação ao P1. Isso reflete a atividade das formigas no P2 e sua preferência no forrageamento por plantas do grupo das Eudicotiledoneae (Della Lucia; Oliveira, 1993; Howard, 1987; 1988; Fey, 1970).

5. 4 Mudanças Paleoambientais e dinâmica da vegetação do Holoceno médio aos dias atuais

Os dados *multiproxy* obtidos, permitiram identificar mudanças na estrutura da vegetação na área do estudo. Mudança mais significativa foi observada na transição do Greenlandiano (Holoceno inferior) para o Northgrippiano (Holoceno médio) até o Meghalayano (Holoceno superior).

As amostras de serrapilheiras e do horizonte A (de P1 e P2; 0-20cm) apresentam composição isotópica e fitolítica que reflete vegetação local, uma

mata reflorestada com espécies nativas da FESD (predomínio de plantas C₃). A FESD recobria a maior parte da região Oeste do Paraná e foi drasticamente retirada durante o processo de ocupação da região nos anos 1940/1950 (Maack, 1981; Serra, 1992).

A história paleoambiental preservada por esses perfis remonta ao Northgrippiano, desde aproximadamente 7000 anos cal. AP. e distinguem três momentos ambientais:

O Momento Ambiental I é caracterizado por uma vegetação mista de plantas C₃ e C₄ (~50%). Essa condição é relatada também em estudos semelhantes realizados nas regiões Oeste (Chiapini, 2021; Santos, 2023) e Noroeste do Paraná (Steveaux 1994; 2000; Parolin *et al.*, 2006; Marcolin, 2022) e no estado de São Paulo (Pessenda *et al.* 1996; 1998; Souza, 2019; Rodrigues, 2019). Esses estudos assinalam uma condição mais seca que a atual, porém não representa o período mais seco dentro do Holoceno.

Os índices fitolíticos assinalam condições de temperatura moderada para esse momento. Esses resultados vêm ao encontro de estudos que apontam um aumento de temperatura em comparação ao Holoceno médio (Northgrippiano) na região Sudeste do Brasil (Oliveira *et al.* 2008).

O Momento Ambiental II assinala uma diminuição da umidade no final do Holoceno médio. A vegetação apresenta abertura, com menor densidade arbórea, composta predominantemente por plantas C₄, que correspondem em P1 e P2, respectivamente, a 43% (\pm 11,5) e 60% (\pm 7,8), da composição da MOS, assinalando uma vegetação de Cerrado (*stricto sensu?*). A literatura indica que durante o Holoceno médio as condições de umidade apresentaram melhores nas regiões Sudeste e Sul (Behling *et al.* 2002; Oliveira *et al.* 2008). Entretanto, os resultados desse estudo, que assinalam condição mais seca para esse período corroboram aqueles realizados no Noroeste do Paraná (Santos, 2013; Golovat, 2015; Steveaux, 2020) e no Centro-Oeste de São Paulo (Souza *et al.* 2019) que apontam uma fase mais seca em torno de 3500 anos, na transição para o Holoceno superior (Meghalayano). Essa idade é compatível com a transição do segundo para o terceiro momento ambiental.

O Momento Ambiental III acompanha o início do Meghalayano, e assinala um aumento das condições de umidade, favorecendo a instalação de uma vegetação mais arborizada, composta predominantemente por plantas C₃. Essa

melhora nas condições de umidade do ambiente tem sido registrada nas regiões Sul e Sudeste por diversos autores (Pessenda *et al.* 1996; Steveaux, 2000; Behling, 1997; 2002; Fernandes, 2008; Calegari *et al.* 2013; Santos, 2013; Souza *et al.* 2019, Marcolin *et al.* 2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas constata-se que a composição, distribuição e preservação da assembleia de fitólitos do solo não foram significativamente impactados pela atividade das formigas *Atta* a ponto de alterar a assinatura fitolítica do perfil de solo, não interferindo significativamente nas interpretações paleoambientais para a área estudada. Entretanto, verificam-se pequenas alterações na linearidade dos dados fitolíticos (relativos à composição, distribuição e aspectos tafonômicos das assembleias), isotópicos e químicos de P2 em comparação ao P1 (perfil de referência), sobretudo em profundidade.

A luz do conjunto de dados apresentados conclui-se que:

- A atividade das formigas produz feições macro e micromorfológicas ao retrabalhar o solo e desenvolver sua colônia, fabricando microagregados, macro e micro canais, painelas e montículos, promovendo o transporte e a mistura de material mineral intra e extra perfil.

- As assembleias de P1 e P2 tem constituição e distribuição semelhantes, porém, P2 apresentou maior índice de células tafonomizadas, além de uma distribuição mais errática em profundidade.

- Verifica-se o *input* de material vegetal fresco e o *output* de material residual dos saúveiros pela colônia de formigas, resultando na mistura entre as assembleias de fitólitos antigos e recentes em alguns canais e painelas.

- A movimentação de materiais intra e extra perfil parece estar refletida na maior incorporação de MO de plantas C₃ no solo, empobrecendo o sinal isotópico da MOS, em função dos hábitos e preferência de forrageamento das saúvas.

- Nota-se a ocorrência de zonas fitolíticas semelhantes em P1 e P2 os perfis, sendo possível identificar os mesmos momentos ambientais em ambos;

- Apesar de comprovada, a interferência das saúvas sobre a assembleia de fitólitos é mais intensa nos canais e painelas do formigueiro do que no perfil de solo adjacente.

- As diferenças observadas entre os perfis atestam que a técnica de análise fitolítica, coleta e processamento de amostras, fornece informações paleoambientais seguras, mesmo em solos altamente bioturbados.

Por fim, pretende-se desenvolver novas pesquisas com enfoque na bioturbação produzida por este e pelos demais engenheiros de ecossistemas em

diferentes tipos de solo e contextos ambientais, aprimorando as análises e expandindo o conhecimento acerca a influência da macrofauna edáfica sobre as assembleias de fitólitos.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J. D. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering process. **Geochimica et Cosmochimica**, v.61, p.677–682, 1997.
- ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J. D. Holocene Phytolith and Carbon-Isotope Record from Latosol at Salitre, South-Central Brazil. **Quaternary Research** 51, 187–194. 1999.
- ARIOLI, E. E.; LICHT, O. A. B. **O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná: mapeamento geológico das cartas 1:250.000 de Guaíra, Cascavel, Campo Mourão, Foz do Iguaçu, Guaraniaçu, Guarapuava, Pato Branco e Clevelândia.** Curitiba: MINEROPAR, 2 v, 2013.
- AUTUORI, M. Investigações sobre a biologia da saúva. **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 62, n. spe1, p. 4-12, 2010.
- BARTOLI F.; WILDING, L. P. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. **Soil Sci. Soc. of America Journal**, 44: 873-878,1980.
- BEHLING, H. South and southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 177, 19–27, 2002.
- BEHLING, H. Late quaternary vegetation, climate and fire history of the Araucaria Forest and Campos region from Serra Campos Gerais, Paraná state (south Brazil). *Rev. Palaeobot. Palynol.* 97, 109–121, 1997.
- BIEBER, A. G. D., OLIVEIRA, M. A., WIRTH, R., TABARELLI, M.; LEAL, I.R. Do abandoned nests of leaf-cutting ants enhance plant recruitment in the Atlantic Forest? **Austral Ecology**, 36: 220-232. 2011.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; DOS SANTOS, G. F.; PASSOS, E.; & SUGUIO, K. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais.** Florianópolis: Ed. da UFSC. 1994.
- BLAAUW, M.; CHRISTEN, J. A. Flexible paleoclimate age depth models using an autoregressive gamma process. **Bayesian Analysis** 6(3):457–474, 18. 2011.
- BLACKMAN, E., & PARRY, D.W. Opaline silica deposition in rye (*Secale cereale* L.). **Annals of Botany** 32, 199–206. 1968.
- BRANSTETTER, M. G; JESOVNIK, A; SOSA-CALVO, J.; LLOYD, M. W.; FAIRCLOTH B. C.; BRADY, S. G.; SCHULTZ T. R. 2017. Dry habitats were crucibles of domestication in the evolution of agriculture in ants. **Proc. R. Soc. B** 284: 20170095.<http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.0095>

BREMOND, L. ALEXANDRE, A.; HÉLY, C. e GUIOT, J. A phytolith index as a proxy of tree cover density in tropical areas: Calibration with Leaf Area Index along a forest-savanna transect in southeastern Cameroon. **Global and Planetary Change**, v. 45, n. 4, p. 277–293, 2005.

BORBA-ROSCHER, M.; ALEXANDRE, A.; VARAJÃO, A; F; D. C.; MEUNIER, D.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F. Phytoliths as indicators of pedogenesis and paleoenvironmental changes in the Brazilian cerrado. **Journal of Geochemical Exploration**, 88:172-176, 2006.

BOUTTON, T. W. Stable carbon isotope ratios of soil organic matter and their use as indicators of vegetation and climate change. In: BOUTTON, T. W.; YAMASAKI, S. I. (Ed.). **Carbon isotopes techniques**. New York: Marcel Dekker, 1996.

CALEGARI, M. R. Ocorrência e significado paleoambiental do Horizonte A húmico em Latossolos. [Tese de Doutorado] Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2008.

CALEGARI, M.R.; LOPES PAISANI, S. D.; CECCHET, F. A.; LIMA EWALD, P. L. DE; OSTERRIETH, M. L.; PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E. Phytolith signature on the Araucarias Plateau – Vegetation change evidence in Late Quaternary (South Brasil). **Quaternary International**, v. 434, 2017.

CALEGARI, M. R.; MADELLA, M.; VIDAL-TORRADO, P.; OTERO, X. L.; MACIAS, F.; OSTERRIETH, M. Opal phytolith extraction in oxisols. **Quaternary International**, v. 287, 2013a.

CALEGARI, M. R.; MADELLA, M.; VIDAL-TORRADO, P.; PESSEDA, L.C.R.; MARQUES, F.A. Combining phytoliths and $\delta^{13}\text{C}$ matter in Holocene palaeoenvironmental studies of tropical soils. **Quaternary International**, v. 287, p. 56–62, 2013b.

CALEGARI, M. R.; RAITZ, E.; MENEGAZZI, C. P.; CECCHET, F. A.; FELIPE EWALD, P. L. L.; BRUSTOLIN, L. T. **Phytolith signature from grassland and araucaria forest in Southern Brazil**. In: Coe, H. H. C.; Osterrieth, M. L. (Editores) *Synthesis of Some Phytolith Studies in South America (Brazil and Argentina)*, 2014.

CALEGARI, M. R.; PAISANI, S. D. L.; CECCHET, F. A.; EWALD, P. L.; OSTERRIETH, M. L.; PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E. Phytolith signature on the Araucarias Plateau – Vegetation change evidence in Late Quaternary (South Brasil). **Quaternary International**, v. 434, 2017.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. **Tópicos em ciência do solo** 3, 107-164, 2003.

CASTRO, S. S.; COOPER, M. **Fundamentos de micromorfologia de solos**. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Minas Gerais, 2019.

CHIAPINI, M. Long and short-term pedogenetic processes in ferralsols from magmatic province of Paraná, Brazil. 2021. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

CECCHET, F. A. **Conjunto de Fitólitos dos Estratos Inferiores da Floresta Ombrófila Densa: Subsídios Para Reconstrução Paleoambiental**. [Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Geografia], Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Marechal Cândido Rondon: 2012.

COLEMAN, D.C.; WALL, D.H. Soil fauna: occurrence, biodiversity, and roles in ecosystem function. *In*: E.A. PAUL (ed.). **Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry**. 4th Edition. Elsevier Publishers. 2014.

COE, H. H. G.; MACARIO, K.; GOMES, J. G.; CHUENG, K. F.; OLIVEIRA, F.; GOMES, P. R. S.; CARVALHO, C.; LINARES, R.; ALVES, E.; SANTOS, G. M. Understanding Holocene variations in the vegetation of Sao Joao River basin, southeastern coast of Brazil, using phytolith and carbon isotopic analyses. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 415, p. 59–68, 2014.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P., CHAPLOT, V. Origin of microaggregates in soils with ferralic horizons. **Sci. Agric.** 62, 256–263. 2005a.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **R. Bras. Ci. Solo**, 29, 581–595. 2005b.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; GRIMALDI, M. Soil structure transformations from ferralic to nitic horizons on a toposequence in southeastern Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** 34 (5), 2010.

COOPER, M.; BOSCHI, R. S.; SILVA, V. B. SILVA, L. F. S. Software for micromorphometric characterization of soil pores obtained from 2-D image analysis. **Sci. Agric.**, 73 pp. 388-393, 2016.

COOPER, M. CASTRO, S. S. de COELHO, M. R. Micromorfologia do solo. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt.5, cap.1, p.527-564. 2017.

DARWIN, C. **The Formation of Vegetable Mould, Through the Action of Worms with Observations on Their Habits**. Murray, London, 1881.

DELLA LUCIA, T. M. C. **Formigas cortadeiras: da bioecologia ao manejo**. Viçosa, MG: Ed da UFV, 2011.

DELLA LUCIA, T. M. C.; OLIVEIRA, P. S. Forrageamento. *In*: T. M. C. Della Lucia (Ed.), As formigas cortadeiras. pp. 84–105. Viçosa: Folha de Viçosa. 1993.

DEVOS, Y.; VRYDAGHS, L. Looking at Phytoliths in Archaeological Soil and Sediment Thin Sections. **Environmental Archaeology**, 1 – 16, 2023.

DEVOS, Y., L. VRYDAGHS, O. COLLETTE, R. HERMANS, S.; LOICQ. Understanding the Formation of Buried Urban Anthrosols and Technosols: An Integrated Soil Micromorphological and Phytolith Study of the Dark Earth on the Mundaneum Site (Mons, Belgium). **Catena**, 215, 106322, 2022.

DEVOS, Y., WOUTERS, B., VRYDAGHS, L., TYS, D., BELLENS, T., SCHRYVERS, A. A soil micromorphological study on the origins of the early medieval trading centre of Antwerp (Belgium). **Quaternary Int.** 315, 167–183, 2013.

DIESTER-HAAS, L., SCHRADER, H.-J.; THIEDE, J. (1973) Sedimentological and paleoclimatological investigations of two pelagic ooze cores off Cape Barbas, North-West Africa. Meteor Forschungsergebnisse: Reihe C, Geologie und Geophysik, 16. pp. 19-66.

DRESS, L. R.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; SENKAYI, A. L. Silica in Soils: Quartz and Disordered Silica Polymorphs. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. [S. I.]: SSSA Books, 1989. n. 1., 913-974 p.

ENDRINGER, F. B. Comportamento de forrageamento da formiga *Atta robusta* Borgmeier 1939 (Hymenoptera: Formicidae). Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2011.

EMBRAPA. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná: Tomo I e II**. Curitiba: EMBRAPA - SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 1984.

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

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Biology**, v. 50, p. 641–664, 1999.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. **Studies in Plant Science**, v. 8, p. 1–15, 1 jan. 2001.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, v. 155, n. 2, p. 155–160, out. 2009.

FARMER, V.C., DELBOS, E., MILLER, J.D. The role of phytolith formation and dissolution in controlling concentrations of silica in soil solutions and streams. **Geoderma**, 127 (1–2), 71–79, 2005.

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K.T. Carbon isotope discrimination in photosynthesis. **An. Rev. of Plant Phys. and Plant Mol. Bio.**, 40, pp. 503-537, 1989.

FELIPE, P. L. L. **Coleção De Referência De Fitólitos De Eudicotiledoneae da Floresta Ombrófila Densa: Subsídios Para Estudos Paleoambientais Em Regiões Tropicais.** [Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Geografia] - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campu Marechal Cândido Rondon: 2012.

FELIPE, P. L. L.; CECCHET, F. A.; CALEGARI, M. R.; RUIZ PESSEDA, L. C. Análise isotópica ($\delta^{13}C$) de um Cambissolo Húmico em Abelardo Luz-SC. **Boletim de Geografia**, v. 33, p. 150-163, 14, 2016.

FISHKIS, O.; INGWERSEN, J.; LAMERS, M.; DENYSENKO, D.; STRECK, T. Phytolith transport in soil: A laboratory study on intact soil cores. **European Journal of Soil Science**, v. 61, n. 4, p. 445–455, 2010a.

FISHKIS, O. INGWERSEN, J.; LAMERS, M. DENYSENKO, D. STRECK, T. Phytolith transport in soil: A field study using fluorescent labelling. **Geoderma**, v. 157, n. 1–2, p. 27–36, 2010b.

FISHKIS, O.; INGWERSEN, J.; STRECK, T. Phytolith transport in sandy sediment: Experiments and modeling. **Geoderma**, v. 151, n. 3–4, p. 168–178, 2009.

FONSECA, C. F. Estudo paleoambiental em enclaves úmidos e subúmidos do Cariri Paraibano. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba UFPB. João Pessoa, PB. 2023.

FORTI, L. C.; MOREIRA, A. A.; CAMARGO, R. S.; CALDATO, N.; CASTELLANI, M. A. Nest architecture development of grass-cutting ants. **Rev. Bras. Entomol.** 62 (1), 46-50. 2018.

FREDLUND, G. G.; TIESZEN, L.T. Modern phytolith assemblages from the North American Great Plains. **Journal of Biogeography**, 21, 3: 321- 335. 1994.

FUNK, R., BUSSE, J., SIEGMUND, N., SOMMER, M., ITURRI, L.A., PANEBIANCO, J.E., AVECILLA, F., BUSCHIAZZO, D.E. Phytoliths in particulate matter released by wind erosion on arable land in La Pampa, Argentina. **Front. Environ. Sci.** v. 10, 2022.

GABET, E. J.; REICHMAN, O. J.; SEABLOOM, E. W. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v.31, p.249-273, 2003.

GOUVEIA, S.E.M.; PESSEDA, L.C.R.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; ROVERATTI, R.; GOMES, B.M. Dinâmica de vegetações durante o Quaternário recente no sul do Amazonas, indicada pelos isótopos do carbono (C-12, C-13, C-14) do solo. **Geochimica Brasiliensis**, São Paulo, v. 11, n.3, p. 355-367, 1997.

GOUVEIA, S. E. M., PESSEDA, L. C. R., ARAVENA, R., 1999. Datação da fração húmica da matéria orgânica do solo e sua comparação com idades ^{14}C de carvões fósseis. *Quím. Nova*, 22, 810–814.

GARDNER, C. M. K. et al. Soil physical constraints to plant growth and crop production. FAO AGL/ MISC/24/99. Rome, Italy, 11, 1999.

HART, D.M., HUMPHREYS, G.S. The mobility of phytoliths in soils; pedological considerations. First European meeting on phytolith research. In: Pinilla, A., JuanTresserras, J., Machado, M.J. (Eds.), **The State-of-the-art of Phytoliths in Soils and Plants**. Centro de Ciencias Medioambientales Monograph, Madrid, pp. 93–100. 1997.

HART, D. M. **A field appraisal of the role of plant opal in the Australian environment**. [s.l.] Macquarie University, Sydney, 1992.

HART, D. M. The influence of soil fauna on phytolith distribution in an Australian soil. In: HART, D. M.; WALLIS, L. A. (Eds.). **Phytolith and starch research in the Australian-Pacific-Asian regions: the state of the art**. Terra Aust ed. Canberra, Australia: PANDANUS BOOKS, 2003. p. 83–92.

HART, D. M.; HUMPHREYS, G. S. Distribution and mobility of spherical opaline phytoliths in a podzol. In: SuperSoil: 3rd Australian New Zealand Soils Conference, 2004.

HART, D. M.; HUMPHREYS, G. S. Phytolith depth functions in surface regolith materials. In: *Advances in Regolith*. [PhD Thesis]. p.159 –163, 2003.

HOGG, A. G.; HEATON, T. J.; HUA, Q.; PALMER, J. G.; TURNEY, C. S. M.; SOUTHON, J.; BAYLISS, S.; BLACKWELL, P. G.; BOSWIJK, C.; et al. SHCal20 Southern Hemisphere Calibration, 0–55,000 Years cal BP. **Radiocarbon** 62(4): 759–778. 2020.

HOLE, F. D. A classification of pedoturbation and some other processes and factors of soil formation in relation to isotropism and anisotropism. **Soil Science**, v. 91, n. 6, p. 375–377, 1961.

HOLE, F. D. Effects of animals on soil. **Geoderma**, v.25, p.75–112, 1981.

HOGBERG, P. Tansley Review ^{15}N natural abundance in soilplant systems. *New Phytol.*, v.137, p.179-203. 1997.

HUA, Q.; TURNBULL, J. C.; SANTOS, G. M.; RAKOWSKI, A. Z.; ANCAPICHÚN, S.; et al. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2019. **Radiocarbon** 64(4): 723–745. 2022.

HUMPHREYS, G. S.; HART, D. M.; SIMONS, N.; FIELD, R. J. Phytoliths as indicators of process in soils. In: HART, D. M.; WALLIS, L. A. (Eds.). **Phytolith and starch research in the Australian-Pacific-Asian regions: the state of the art**. Canberra, Australia: Pandanus Books, 2003. p. 93 –104.

HUTTON, J. **Theory of the Earth, With Proofs and Illustrations**. Edinburgh: printed for Messrs Cadell, Junior, and Davies, London; and William Creech, Edinburgh, 1795.

IRESON, M.; BUTLER, A. **A review of soil bioturbation and soil development**. Tech. Rep. 639 Imperial/NRP_018, United Kingdom Nirex Limited. 2009.

ICPT - International Committee for Phytolith Taxonomy. **International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0**. *Annals of Botany*, v.124 (2), p.189–199, 2019.

JAYAWARDENA, U. DE S.; IZAWA, E. A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: A study from Sri Lanka. **Engineering Geology**, v. 36, n. 3–4, p. 303–310, 1994.

JANZEN, H. H. The Soil Remembers. **Soil Science Society of America Journal**, v.80, p.1429-1432, 2016.

JOHNSON, D. I. Biomantle evolution and the redistribution of Earth materials and artifacts. **Soil Sci.** 149, 84–102. 1990

JOHNSON, D. L.; WATSON-STEGNER, D. Evolution model of Pedogenesis. **Soil Science**, v. 143, n. 5, p. 349–366, 1987.

JOUQUET, P.; JAMOTEAU, F.; MAJUMDAR, S.; PODWOJEWSKI, P.; NAGABOVANALLI, P.; CANER, L.; BARBONI, D.; MEUNIER, J.-D. The distribution of Silicon in soil is influenced by termite bioturbation in South Indian Forest soils. **Geoderma**, v. 372, p.114 – 362, 2020.

KAMMER, A. P. Reconstituição paleoambiental da vegetação da estação ecológica de Assis-SP. A trajetória evolutiva do Cerrado no Holoceno. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Trabalho de Conclusão de Curso-Licenciatura em Geografia. 2018

KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; & VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). *Pedologia: fundamentos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.

LANA, M. C. FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R.; RICHART, A.; FONTANIVA, S. **Análise química de solo e de tecido vegetal: metodologias analíticas**. EDUNIOESTE, 2016.

LEAL, I.R., FILGUEIRAS, B.K.C., GOMES, J.P. Effects of habitat fragmentation on ant richness and functional composition in Brazilian Atlantic Forest. **Biodivers Conserv** 21, 1687–1701, 2012.

LEE, K. E.; FOSTER, R. C. Soil Fauna and Soil Structure. **Australian Journal Soil Research**, v. 29, p. 745–775, 1991.

LICHT, O. A. B.; ARIOLI, E. E. Mapa geológico do Grupo Serra Geral no Estado do Paraná. Instituto de Terras, Cartografia e Geologia – ITCG, Curitiba, v.1, 318 p, 2018.

LIU, L.; JIE, D.; LIU, H.; GAO, G.; LI, D.; LI, N. Translocation and preservation of soil phytoliths in temperate regions and its implications for palaeoenvironment reconstruction. **Catena**, v. 195. 2020.

LOBRY DE BRUYN, L.; CONACHE, A. J. Soil modification by termites in the central wheatbelt of Western Australia. **Aust. J. Soil Res.**, v.33, 179 – 193, 1995.

LUZ, L. D.; KALINOVSKI, E. C. Z.; PAROLINA, M.; FILHO, E. E. S. **Estágio atual do conhecimento sobre fitólitos no Brasil**. Terrae Didática. 11 (1). 2015 (p. 52-64).

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2ªed. Livraria José Olímpio. 1981.

MACPHAIL, R. I.; MCAVOY, J. M. A micromorphological analysis of stratigraphic integrity and site formation at Cactus Hill, an Early Paleoindian and hypothesized pre-Clovis occupation in south-central Virginia, USA. **Geoarchaeology**, 23(5), 675–694. 2008.

MADELLA, M.; ALEXANDRE A.; BALL T. International Code for Phytolith Nomenclature 1.0. **Annals of Botany**, v.96 (2), p. 253-260, 2005.

MADELLA, M.; LANCELOTTI, C. Taphonomy and phytoliths: a user manual. **Quaternary International**, v. 275, p.76-83, 2012.

MARCOLIN, L.; CALEGARI, M. R.; SANTOS, L. J. C.; CAMARGO, P. B. Phytoliths, $\delta^{13}\text{C}$ and Charcoal: holocene environmental memories from a paleogully in northwestern Paraná State. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023.

MARICONI, F. A. M. **As saúvas**. São Paulo, Editora Agronômica “Ceres”, 1970.

MARTINELLI, L. A.; PESSEDA, L. C. R.; ESPINOZA, E. CAMARGO, P. B.; TELLES, E. C. C.; CERRI, C. C.; VICTORIA, R. L.; ARAVENA, R.; RICHEY, J.; TRUMBONE, S. Carbon-13 variation with depth in soils of Brazil and climate change during the quaternary. **Oecologia**, v. 106, p. 376-381, 1996

MARTINS, G. M. Efeitos da ação de cupins sobre propriedades de um perfil de solo em uma vertente da Represa Billings - São Bernardo do Campo / SP. [s.l.] USP, 2007.

MATTHEWS, W. Geoarchaeology and Taphonomy of Plant Remains and Microarchaeological Residues in Early Urban Environments in the Near East. **Quaternary International** 214: 98–113. 2010.

MIKLÓS, A. A. W. **Biogênese do solo**. Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume Especial 30, p. 190-229, 2012.

MOFATTO, M; PESSENDA, L. C. R; OLIVEIRA, DE P; GARCIA, R. J. F; BENDASSOLI, J. A; LEITE, A. Z. ¹⁴C Dating and stable carbon isotopes of soil organic matter in the southeastern region of São Paulo state. *In: International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2005*. Santos - SP, Brazil. 2005.

MONTTI, L.; HONAINÉ, M.F.; OSTERRIETH, M.; RIBEIRO, D.G. Phytolith analysis of *Chusquea ramosissima* Lindm. (Poaceae: Bambusoideae) and associated soils". **Quaternary International**. 193(1-2):80-89, 2009.

MOORE, P.D., WEBB, J.A. AND COLLINSON, M.E. Pollen Analysis. 2nd Edition, Blackwell, Oxford, 1-216. 1991.

MORAES S. A. L. S.; COOPER M.; CASTRO S. S.; SILVA L. F. S. Protocolo de impregnação e confecção de blocos e lâminas delgadas de solos e sedimentos. Res. *In: Anais XXXV CBCS, SBCS, Natal*. 2015.

MOZER, J. H. **Coleção de Referência de Fitólitos e Reconstituição Paleoambiental da Floresta Ombrófila Densa Altomontana no Parque Estadual Carlos Botelho - SP**. [s.l.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná-Campus Marechal Cândido Rondon, 2021.

MULHOLLAND, S. C. Phytolith shape frequencies in North Dakota grasses: a comparison to general patterns. **J. of Archeological Science**, v.16, p.489–511, 1989.

NITSCHÉ, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. F. Atlas do Estado do Paraná. Instituto Agrônômico do Paraná, Londrina. 2019.

NKEM, J.N., DE BRUYN, L.A.L., GRANT, C.D. & HULUGALLE, N.R.: The impact of ant bioturbation and foraging activities on surrounding soil properties. – **Pedobiologia** 44: 609-621. 2000.

OSTERRIETH, M.; MADELLA, M.; ZURRO, D.; FERNANDA ALVAREZ, M. Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. **Quaternary International**, v.193, p.70–79, 2009.

PAROLIN, M.; RASBOLD, G.G.; PESSENDA, L.C.R. Primeiras considerações palinológicas e paleoclimáticas do Pleistoceno Tardio na região de Campo Mourão, Paraná, Brasil. *In: Cong. Abequa*, 13, 2011. Res. Expand., Búzios, RJ, Ass. Bras. Est. do Quaternário, 2011.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 51:1173–1179. 1987.

PASSONI, S.; BORGES, F. S.; PIRES, L. F.; SAAD, S. C.; COOPER, M. Software Image J to study soil pore distribution. **Agricultural Sciences**, 38 (2),2014

PESSENDA, L. C. R. The use of carbon isotopes (^{13}C , ^{14}C) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in Central Brazil. **Radiocarb.** 38, 191–201, 1996.

PESSENDA, L. C. R.; VALENCIA, E. P. E.; ARAVENA, R.; TELLES, E. C. C.; BOULET, R. Paleoclimate studies in Brazil using carbon isotopes in soils. **Environmental geochemistry in the tropics**. Berlin: Springer; 1998.

PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; FREITAS, H. A.; RIBEIRO, A. S.; ARAVENA, R. BENDASSOLLI, J. A.; LEDRU, M. P.; SCHEELYBERT, R. Isótopos do carbono e suas aplicações em estudos paleoambientais. **Quartenário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2005.

PEARSALL, D. M. Phytolith Analysis. *In*: PEARSALL, D. M. (Ed.). **Paleoethnobotany: A Handbook of Procedures**. p.572–754, 2016.

PINTO-TOMÁS, A. A.; ANDERSON, M. A.; SUEN, G.; STEVENSON, D. M.; CHU, F. S.; CLELAND, W. W.; WEIMER, P. J.; CURRIE, C. R. Symbiotic nitrogen fixation in the fungus gardens of leaf-cutter ants. **Science**. Nov 20; 326(5956), 2009.

PIPERNO, D. **Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists**. 2006.

PIPERNO, D. R. **Phytolith Analysis: An Archeological and Geological Perspective**. San Diego. 1988.

PRICE, J. R.; VELBEL, M. A. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. **Chemical Geology**, v. 202, n. 3–4, p. 397–416, 2003.

RAITZ, E. **Coleção de referência de silicofitólitos da flora do Sudoeste do Paraná: subsídios para estudos paleoambientais**. [Dissertação de Mestrado - PPG em Geografia] Universidade Estadual do Oeste do Paraná- Campus Francisco Beltrão, 2012.

RESENDE, M., SANTANA, D.P. Uso das relações K_i e K_r na estimativa da mineralogia para classificação dos latossolos. *In*: Reunião de classificação, correlação de solos e interpretação de aptidão agrícola, Rio de Janeiro. EMBRAPA-SNLCS, 225–232, 1988.

RIBEIRO, M. M. R.; MARINHO, C. G. S. Seleção e Forrageamento em Formigas Cortadeiras. *In*: DELLA LUCIA, T. M. C. Formigas cortadeiras: da bioecologia ao manejo. Viçosa, MG: Ed da UFV, 2011.

RODERJAN, C. V. et al. As unidades fitogeográficas do estado do paraná, brasil. **Ciência & Ambiente**, v. 24, p. 75–92, 2002.

RODRIGUES, B. M. **Bioturbação e distribuição de fitólitos em Latossolos da Depressão Periférica Paulista**. [Dissertação de Mestrado] Universidade de São Paulo - USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Piracicaba, SP. 2018.

ROVNER, I. Potential of Opal Phytoliths for Use in Paleoecological Reconstruction. **Quaternary Research**, v.1, p.343-359, 1971.

RUNGE, F. The opal phytolith inventory of soils in central Africa. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v.107, p.23–53, 1999.

SALGADO-LABOURIAU, M. L. **Crítérios e técnicas para o Quaternário**. Editora Blucher, 2006.

SANTOS, J. C. A. Paleogeografia e Paleoambientes do baixo curso do rio Ivaí-PR. 81f. Dissertação. (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá – PR, 2013

SANTOS, H. G. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa. 2018.

SANTOS, R. D. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 7a ed. 2015.

SANTOS, T. G. Efeito da bioturbação na assembleia de fitólitos em Latossolos da Província Basáltica do Paraná. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon Management and Sustainable Rice Production. In: **Advances in Agronomy**. [s.l: s.n.]. p. 151–199. 1996.

SCHAETZL, R. J.; ANDERSON, S. **Soils: genesis and geomorphology**. 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

SCHEEL-YBERT R. Considerações sobre o método de datação pelo carbono-14 e alguns comentários sobre a datação de sambaquis. **Rev. Museu de Arqueologia e Etnologia**, 9:297- 301. 1999.

SILVA, B. A. Condicionantes morfoestruturais na evolução da paisagem no oeste do Paraná e suas interações com os latossolos vermelhos. 185 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão - PR, 2021.

SILVA, B. A.; CALEGARI, M.R.; PINHEIRO, M.R.; FUJITA, R.H. Lithostructural and tectonic determinants in the geomorphic evolution of the Basalt Plateau –

Southern Brazil. **J. of South Am. Earth Sci.**, 110, 103351, 2021.

SILVA NETO, E. C. D.; CALEGARI, M. R.; PEREIRA, M. G.; MARANHÃO, D. D. C.; SCHIAVO, J. A.; FONTANA, A.; FERNANDES, J. C. F. F. Phytoliths as indicators of pedogenesis and paleoenvironmental changes in Spodosols of the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 636, 2018.

STRÖMBERG, C. A. E.; DUNN, R. R.; CRIFÓ, C.; HARRIS, E. B.; Phytoliths in paleoecology: Analytical considerations, current use and future directions. *Vertebr. Paleobiol. Paleoanthropology* 235 – 287, 2018.

STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. **Soil Science Society of America**. 184 p., 2003.

STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. **Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths**. Amsterdam: Netherlands, Elsevier, 2010.

SOUZA, E. DE. **Reconstituição Paleoambiental a partir do sinal fitolítico na ESEC Caetetus – Gália (SP)**. [Dissertação de Mestrado - PPG em Geografia.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná- Campus Marechal Cândido Rondon: 2019.

SWANSON, A. C.; SCHWENDENMANN, L.; ALLEN, M. F.; ARONSON, E. L.; ARTAVIA-LEÓN, A.; DIERICK, D.; FERNANDEZ-BOU, A.; HARMON, T. C.; MURILLO-CRUZ, C.; OBERBAUER, S. F.; PINTO-TOMÁS, A. A.; RUNDEL, P. W.; ZELIKOVA, T. J. Welcome to the Atta world: A framework for understanding the effects of leaf-cutter ants on ecosystem functions. **Funct. Ecol.** 33, 1386–1399, 2019.

TARGULIAN, V. O.; GORYACHKIN, S. V. Soil memory: Types of record, carriers, hierarchy and diversity. **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, v.21, p. 1-8, 2004.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev ed. Brasília, DF: [s.n.].2017.

TWISS, P. C. Predicted world distribution of C3 and C4 grass phytoliths. In: **Phytolith Systematics: Emerging Issues**. [s.l: s.n.]. p. 113–128. 1992.

TWISS, C.; SUESS, E.; & SMITH, R. M. Morphological classification of grass phytoliths. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.33, p. 109–115, 1969.

VALÉRIO, J. R. **Cupins-de-montículo em pastagens**. Campo Grande, MS: [s.n.]. Disponível em: <<https://old.cnpgc.embrapa.br/publicacoes/doc/doc160/DOC160.pdf>>. 2006

VILLALBA, R.; GROSJEAN, M.; KIEFER, T. Long-term multi-proxy climate

reconstructions and dynamics in South America (LOTRED-SA): State of the art and perspectives. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. V. 281, 3–4, p. 175-179. 2009.

VRYDAGHS, L.; Y. DEVOS. Visibility, Preservation and Colour: A Descriptive System for the Study of Opal. Phytoliths in (Archaeological) Soil and Sediment Thin Sections. **Environmental Archaeology** 25 (2): 170–177. 2020

VRYDAGHS, L.; DEVOS, Y.; PETŐ, A. Phytoliths. *In: Archaeological Soil and Sediments Micromorphology*, edited by C. Nicosia, and G. Stoops, 155–163. Chichester: Wiley. 2017.

VOGEL, J. C. Variability of carbon isotope fractionation during photosynthesis. *in* EHLERINGER, J. R., HALL, A. E., AND FARQUHAR, G. D., eds. **Stable isotopes and plant carbon-water relations**. Academic Press, San Diego, 1993.

WILDING, L.P., SMECK, N.E.; DREES, L. R. Silica in soils: quartz, cristobalite, tridymite and opal. *In: DIXON, J.B.; WEED, S. B. (Ed.). Mineral in soil environments*. 1. ed. Madison: **Soil Science Society of America**, 1977. p. 471–542.

WILKINSON, M. T.; RICHARDS, P. J.; HUMPHREYS, G. S.; **Breaking ground: Pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation**. *Earth-Science Reviews*, v.97, p. 257–272, 2009.

WILSON, E. O.; HÖLLDOBLER **The Superorganisms: the beauty, elegance, and strangeness of insect societies**. W. W. Norton & Company, New York, 1978.

ZMITROWICZ, W. **As estruturas territoriais dos insetos**. *Estudos Avançados*, v.15, p.193-212, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Descrição do Perfil de Solo 1

PERFIL 01

CLASSIFICAÇÃO (SIBCS, 2018): LATOSSOLO VERMELHO Eutróférico típico

LOCALIZAÇÃO: Distrito de Porto Mendes, Marechal Cândido Rondon.

SITUAÇÃO NA PAISAGEM: Terço inferior da vertente.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA: Formação Serra Geral (Cretáceo).

MATERIAL DE ORIGEM: Basalto.

RELEVO LOCAL: Suave ondulado, vertentes longas e convexas.

RELEVO REGIONAL: Suave Ondulado (<8%).

DRENAGEM: Bem drenado.

EROSÃO: Não observada.

CONTATO LÍTICO: Ausente.

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa.

ROCHOSIDADE: Não rochosa.

CLIMA: Cfa - Subtropical úmido mesotérmico, classificação de Köppen.

VEGETAÇÃO: Floresta Estacional Semidecidual.

USO ATUAL: Reflorestamento.

DESCRITO E COLETADO: Carolina G. Benincá, Marcia R. Calegari, Patrícia A. Oliveira, Altair Bennert, Ericson H. Hayakawa.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A	0-20 cm	<i>Dark reddish brown</i> (2.5YR 2.5/4); textura muito argilosa; estrutura em blocos subangulares pequenos e muito pequenos ligeiramente dura, friável; ligeiramente plástica e não pegajosa; transição clara e plana; Raízes abundantes, finas, pivotantes e fasciculadas; atividade biológica comum, galerias preenchidas por terra; fragmentos de carvão milimétricos; parcialmente compactada.
AB	20-30 cm	<i>Dark reddish brown</i> (2.5YR 2.5/4); textura muito argilosa; estrutura em blocos angulares e subangulares médios que se desfazem em blocos angulares muito fortes; macia/ ligeiramente dura, friável; ligeiramente plástica não pegajosa; transição clara e plana. Raízes poucas e muito finas; atividade biológica abundante; parcialmente compactada.

Bw1	30-50 cm	<i>Dark reddish brown (2.5YR 2.5/4)</i> ; textura muito argilosa; estrutura em blocos angulares grandes que se desfaz em blocos pequenos e médios mais fracos; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana. Atividade biológica comum com galerias preenchidas.
Bw2	50-95 cm	<i>Dark reddish brown (2.5YR 2.5/4)</i> ; textura muito argilosa; estrutura em blocos subangulares médios; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana. Raízes poucas e muito finas; atividade biológica abundante com galerias preenchidas.
Bw3	95-165 cm	<i>Dark reddish brown (2.5YR 2.5/4)</i> ; textura muito argilosa; estrutura em blocos subangulares fracos, pequenos e médios; friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição difusa. Raízes médias e finas; atividade biológica abundante.
Bw4	165-200 cm	<i>Dark reddish brown (2.5YR 2.5/4)</i> ; textura muito argilosa; estrutura em blocos subangulares pequenos, que se desfazem facilmente; muito friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição difusa. Raízes poucas, médias e finas; atividade biológica abundante.

APÊNDICE B - Descrição Micromorfológica das Lâminas Delgadas

Perfil	Lâmina	Material Grosso	Material Fino	Distribuição Relativa	Microestrutura	Porosidade	Pedofeições
P1	1: 15-27cm Horizonte BA	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado e subesféricos, alisados;	Bruna; <i>B-fabric</i> anisotrópica poroestriada	Porfírica aberta Grossos: 15%; Finos: 55%; Poros: 30%.	Blocos subangulares médios (70%) e grandes (30%).	Fissuras; cavidades; canais e câmaras.	Nódulos típicos puros; preenchimentos soltos e descontínuos e densos contínuos; raízes e resíduos biológicos.
P1	2: 42 - 54cm Horizonte Bw1	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado e subesféricos, alisados;	Bruno-avermelhado (YR); <i>B-fabric</i> anisotrópica poroestriadas e granoestriada	Porfírica aberta Grossos: 10%; Finos: 60%; Poros: 30%.	Blocos subangulares médios (70%), grandes (20%) e pequenos (10%).	Fissuras; cavidades; canais e câmaras.	Nódulos típicos puros; Excrementos esferoidais e elipsoidais envelhecidos, de coalescência e desintegração moderadas; preenchimentos soltos, contínuos e descontínuos densos;
P1	3: 110-122cm Horizonte Bw2	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado e subesféricos, alisados;	Bruno-avermelhado (YR); <i>B-fabric</i> anisotrópica indiferenciada.	Porfírica enáulica Grossos: 10%; Finos: 40%; Poros: 50%.	Granular e Blocos subangulares; Agregados: b. subang. (80%) microgranular (10%); microgranular coalescido (10%).	Fissuras; cavidades elipsoidais; canais; câmaras e empilhamento composto.	Nódulos típicos puros; Preenchimentos soltos e descontínuos e densos contínuos.
P1	4: 150-162cm Transição Bw1-Bw2	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado e subesféricos, alisados;	Bruna; <i>B-fabric</i> indiferenciada.	Porfírica aberta Grossos: 10%; Finos: 65%; Poros: 25%.	Granular; Pedalidade fraca a moderada; Agregados: microgranulares coalescidos e granulares.	Empilhamento composto; canais; cavidades; câmaras e fissuras.	Nódulos típicos puros; Excrementos esferoidais e elipsoidais envelhecidos, de coalescência e desintegração moderadas. Preenchimentos soltos e densos.

Perfil	Lâmina	Material Grosso	Material Fino	Distribuição Relativa	Microestrutura	Porosidade	Pedofeições
P2	5: 46-58cm Horizonte Bw2	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado, esféricos e subesféricos, alisados;	<i>B-fabric</i> anisotrópica, salpicada granida e poroestriada	Porfírica aberta Grossos: 5%; Finos: 65%; Poros: 30%	Granular e Blocos subangulares; Pedalidade moderada;	Fissuras; cavidades; canais e câmaras.	Nódulos típicos puros; preenchimentos densos contínuos;
P2	6: 105-127 cm Horizonte Bw1	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado e subesféricos, alisados;	Bruna; <i>B-fabric</i> indiferenciada.	Porfírica Grossos: 10%; Finos: 40%; Poros: 50%	Granular e Blocos subangulares; Pedalidade moderada; Agregados: microg.; microg. coalescidos; e b. subangulares.	Fissuras; empilhamento composto; canais; e câmaras e cavidades.	Nódulos hematíticos típicos puros; Bioporos preenchidos densos e soltos;
P2	7: 97-109 cm Transição Bw2-Bw3	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado e arredondado, esféricos e subesféricos, alisados;	Bruno-avermelhado (YR); <i>b-fabric</i> indiferenciada.	Porfírica aberta (85%) e Porfírica fechada (15%) Grossos: 8%; Finos: 42%; Poros: 50%.	Granular; Pedalidade fraca a moderada; Agregados: microgranulares e coalescidos e microgranulares.	Empilhamento composto; fissuras; câmaras; e canais e cavidades.	Nódulos típicos puros; Excrementos esferoidais e elipsoidais envelhecidos, de coalescência e desintegração moderadas; preenchimentos soltos descontínuos e densos contínuos;
P2	8: 213-223 cm Horizonte Bw4	Grãos de mineral simples; Quartzo subarredondado, subesférico, alisados e ondulados.	Bruno-avermelhado (YR); <i>b-fabric</i> indiferenciada.	Porfírica aberta (80%) e Porfírica fechada (20%) Grossos: 5%; Finos: 45%; Poros: 50%.	Granular; Pedalidade fraca a moderada; Agregados: microgranulares coalescidos.	Empilhamento composto; câmaras; e canais, fissuras e cavidades.	Nódulos típicos puros; Excrementos esferoidais e elipsoidais envelhecidos, de coalescência e desintegração moderadas; preenchimentos soltos descontínuos e densos contínuos.

APÊNDICE C - Resultados da Análise Isotópica

P 1 Prof. (cm)	Amou nt	¹⁵ N	%N	¹³ C	%C	C/N
0	21,37	8,11	0,21	-25,10	2,30	10,72
10	22,26	9,33	0,20	-24,66	2,04	9,98
20	25,91	10,38	0,16	-24,30	1,57	9,67
30	25,91	11,31	0,10	-23,56	0,90	9,02
40	26,48	10,72	0,08	-22,84	0,69	9,08
50	24,98	9,80	0,06	-21,75	0,60	9,58
60	25,04	10,03	0,05	-20,47	0,51	9,86
70	26,32	9,42	0,06	-21,35	0,61	9,75
80	28,09	9,87	0,05	-19,85	0,49	10,46
90	25,61	9,56	0,04	-19,17	0,41	9,80
100	27,38	9,92	0,04	-18,83	0,42	10,31
110	25,31	9,83	0,04	-18,08	0,36	10,05
120	27,82	9,71	0,04	-18,86	0,37	10,33
130	26,07	10,00	0,03	-18,67	0,34	10,27
140	26,57	9,78	0,03	-17,46	0,31	9,94
150	28,53	10,10	0,03	-16,83	0,28	9,88
160	27,75	9,31	0,03	-16,94	0,29	10,14
170	28,53	8,83	0,03	-18,09	0,26	9,80
180	26,61	8,12	0,03	-17,75	0,27	9,62
190	27,59	9,07	0,03	-18,69	0,28	9,97
200	27,59	9,07	0,03	-18,69	0,28	9,97

P2 Prof (cm)	Amou nt	¹⁵ N	%N	¹³ C	%C	C/N
-20	21,20	9,95	0,21	-25,09	2,01	9,62
-10	20,16	9,79	0,19	-25,13	1,81	9,51
0	23,02	9,89	0,18	-25,43	1,80	9,98
10	24,72	9,64	0,08	-23,72	0,72	8,73
20	24,10	9,94	0,07	-23,36	0,64	9,17
30	23,68	9,98	0,06	-22,10	0,55	9,63
40	23,78	9,98	0,06	-21,75	0,51	9,10
50	25,21	9,77	0,05	-21,06	0,47	9,46
60	26,00	9,35	0,05	-20,63	0,44	9,50
70	24,70	9,66	0,05	-20,43	0,45	9,16
80	25,15	9,76	0,04	-19,46	0,39	10,26
90	25,13	10,15	0,03	-17,41	0,31	9,58
100	24,81	10,12	0,03	-17,40	0,31	9,43
110	25,82	9,37	0,03	-17,71	0,29	8,95
120	26,55	9,99	0,03	-17,49	0,26	9,06
130	26,15	7,84	0,03	-18,44	0,28	8,71
140	24,27	10,18	0,03	-18,25	0,28	9,79
150	24,30	9,74	0,03	-19,05	0,29	9,48
160	24,94	7,77	0,03	-20,11	0,29	8,58
170	26,37	8,91	0,03	-19,12	0,28	8,66
180	25,85	9,10	0,03	-18,89	0,25	8,83
190	26,84	9,11	0,03	-18,93	0,24	8,16
200	27,86	8,42	0,03	-19,55	0,25	8,65
210	27,14	8,77	0,03	-20,10	0,25	8,61
220	28,39	8,44	0,03	-19,16	0,22	8,97
230	28,39	8,44	0,03	-19,16	0,22	8,97

Amostra	Prof. (cm)	C¹³	C₃%	C₄%
Topo do formigueiro	0	-30,54	30,54	69,46
Panela de terra	105	-32,61	67,4	32,6
Preenchimento de canal	110	-22,63	89,0	11,0
Panela de folhas	170	-18,08	81,9	18,1
Panela de fungos 1	210	-1,64	98,4	1,6
Terra da panela de fungos 1	210	-0,06	99,9	0,1
Panela de fungos 2	220	2,71	97,3	2,7
Panela de resíduos 1	240	3,99	96,0	4,0
Panela de resíduos 2	280	10,71	89,3	10,7
Terra da panela de resíduos	265	10,70	89,3	10,7
Panela de resíduos 3	270	-48,64	51,4	48,6
Panela de resíduos 4	2770	-43,29	56,7	43,3

APÊNDICE D - Contagem e identificação de fitólitos

Perfil 1:

Morfotipo	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200
ACU_BUL	4	7	5	-	1	4	4	15	2	3	10	7	9	6	7	2	3	4	1	9
AMEB	5	-	1	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
BIL	25	22	25	18	10	13	19	22	2	18	5	12	2	7	5	3	3	8	2	3
BLO	12	9	-	8	5	6	12	6	-	6	10	1	10	7	7	8	-	9	-	-
BLO_CAV	-	-	-	-	2	-	1	-	-	9	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BLO_DET	10	7	11	17	15	1	8	3	1	-	3	-	-	-	-	-	-	2	-	-
BRAC	-	1	3	-	-	1	-	-	2	1	-	-	-	-	3	-	2	-	-	-
BUL_FLA	8	7	6	10	7	21	19	19	22	26	40	35	33	32	53	44	37	34	39	41
CRENATE	3	7	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	5	-	-	-	-	-
ELI_PSI	-	2	1	-	1	-	-	-	-	-	-	2	-	2	-	-	-	-	4	2
ELO_ENT	-	3	15	8	12	17	13	25	26	17	16	19	17	20	6	30	15	18	25	21
ELO_SIN	-	-	-	6	4	1	3	4	5	6	-	3	1	1	2	3	6	-	1	6
ELO_DET	4	8	12	7	6	4	4	4	2	-	-	-	-	1	1	-	5	3	-	-
PLG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	11	9	14
RET	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	6	6	-	6	5	1	3	-	-	5
RON	1	4	3	4	8	4	5	4	9	3	3	-	-	2	3	-	2	-	-	-
SAD	23	27	16	29	20	8	19	19	16	19	6	20	9	18	10	7	9	7	4	-
SAD_COL	57	53	58	41	62	19	23	35	14	24	11	11	9	9	12	13	4	9	5	5
SPH_PSI	5	1	2	9	6	8	9	5	4	7	4	-	11	6	6	15	7	10	16	11
SPH_ECH	7	5	-	3	5	5	-	3	8	2	-	3	4	5	-	2	8	-	7	-
SPH_ORN	8	23	9	14	10	15	19	17	30	3	14	16	17	5	9	5	8	7	12	7
TAB_BLO	12	11	8	20	23	39	25	21	26	24	42	35	50	35	32	33	47	45	31	30
TAB_ELO	18	9	16	10	14	25	21	22	19	19	15	19	25	35	32	29	33	26	25	23
T_ELO_VEL	-	-	-	1	1	3	1	-	-	-	1	-	-	-	1	2	-	-	2	2

TAB_PLG	3	2	-	-	-	2	3	6	3	-	7	7	5	-	-	3	8	-	8	14
TRACH	-	-	-	-	-	3	-	3	-	3	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-
TRZ	9	6	8	-	-	6	5	4	9	9	4	7	1	11	3	3	8	7	9	8
TOTAL	214	214	206	205	212	209	215	237	200	201	202	205	203	212	202	203	213	200	200	201

Perfil 2:

Morfotipo	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200	200-210	210-220	220-230	230-240	240-250
ACU_BUL	1	3	2	1	1	-	-	1	3	1	-	3	2	4	-	2	3	-	3	5	6	2	4	2	-
AMEB	1	1	-	-	-	-	-	1	-	1	-	2	-	-	1	2	1	1	1	-	-	-	-	-	-
BIL	15	23	-	1	15	-	-	-	-	-	-	2	2	2	1	-	-	4	2	-	4	5	3	14	5
BLO	6	-	-	13	14	14	10	11	8	0	-	-	-	14	8	1	-	6	7	-	19	16	22	27	30
BLO_CAV	-	3	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BLO_DET	13	2	-	-	6	-	-	-	-	-	5	-	-	3	2	2	-	-	-	-	4	3	3	-	-
BLO_SIN	-	5	-	-	3	4	-	2	-	2	2	6	6	-	-	-	-	2	3	-	-	2	7	1	-
BRAC	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	5	1	1	4	5	3	2	-	-	-	-	3	6
BUL_FLA	22	13	25	31	21	40	42	46	42	37	45	31	36	27	35	36	44	46	40	43	35	29	30	31	37
CRE	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
ELI_PSI	6	-	5	-	-	-	-	-	-	-	4	6	8	-	9	6	4	3	5	9	6	4	5	3	5
ELO_ENT	1	11	13	-	12	12	16	17	10	9	17	13	7	13	15	24	18	21	-	27	5	7	11	13	14
ELO_SIN	2	-	10	5	4	4	-	3	-	11	12	9	8	10	10	9	14	13	18	7	6	8	9	2	5
ELO_DET	3	4	13	-	5	-	-	-	4	13	7	6	2	2	3	4	7	8	6	9	-	-	-	-	-
PLG	-	6	2	4	3	2	4	2	5	3	2	5	-	-	1	4	-	4	8	3	6	9	8	4	4
RET	3	5	8	-	6	3	6	2	2	4	4	6	4	-	-	-	-	1	-	-	-	2	-	-	-
RON	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-
SAD	10	16	6	-	11	4	-	5	2	-	3	-	4	9	13	15	4	5	2	-	7	6	7	15	8
SAD_COL	49	37	24	10	35	12	21	22	21	11	5	8	6	17	11	6	9	11	8	6	7	8	4	5	6
SPH_PSI	6	10	10	20	7	8	15	14	4	8	16	7	-	14	8	12	9	7	4	13	21	19	15	11	17

SPH_ECH	6	16	0	-	3	2	-	-	-	7	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SPH_ORN	5	12	5	5	5	9	14	13	12	-	8	13	10	7	12	7	14	11	12	10	9	8	9	5	7
TAB_BLO	22	11	34	47	21	37	50	45	48	40	26	36	40	40	36	25	30	27	38	28	33	29	31	28	29
TAB_ELO	19	19	31	42	19	36	34	39	44	38	27	26	31	22	26	23	28	13	23	29	26	32	29	24	24
T_ELO_VEL	-	-	-	7	-	5	-	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TAB_PLG	5	1	7	14	2	10	11	8	5	15	12	11	17	3	6	8	11	6	11	4	6	10	14	11	8
TRACH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-	-	-
TRZ	4	8	4	-	8	2	-	6	2	-	7	9	7	11	8	11	6	7	5	12	-	2	1	4	1
PLATLET	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	203	203	200	201	202	204	223	238	212	200	203	200	200	203	209	201	209	200	200	205	202	203	212	203	206

APÊNDICE E – Idades ^{14}C (modelo R)

