



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



BRAYON MATHEUS FERNANDES

MUDANÇAS PALEOAMBIENTAIS DA SERRA DO GANDARELA, QUADRILÁTERO  
FERRÍFERO (MG), DURANTE O QUATERNÁRIO TARDIO: O ESTUDO DA LAGOA  
DOS COUTOS

MONOGRAFIA nº 546

OURO PRETO  
2025

BRAYON MATHEUS FERNANDES

**MUDANÇAS PALEOAMBIENTAIS DA SERRA DO GANDARELA,  
QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG), DURANTE O QUATERNÁRIO TARDIO: O  
ESTUDO DA LAGOA DOS COUTOS**

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 401, ano 2024/2.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Raquel Franco Cassino

OURO PRETO

2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F363m Fernandes, Brayon Matheus.

Mudanças paleoambientais da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero (MG), durante o Quaternário Tardio [manuscrito]: o estudo da Lagoa dos Coutos. / Brayon Matheus Fernandes. - 2025.

112 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Raquel Franco Cassino.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Paleontologia - Quaternário. 2. Palinologia. 3. Mudanças climáticas. 4. Paleoecologia. 5. Quadrilátero Ferrífero (MG). I. Cassino, Raquel Franco. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 56.02:581.1

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Brayon Matheus Fernandes**

**Mudanças paleoambientais da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero – MG, durante o Quaternário tardio: o estudo da Lagoa dos Coutos**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro geólogo

Aprovada em 22 de maio de 2025

### Membros da banca

Dra. Raquel Franco Cassino - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Cláudio Eduardo Lana (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dra. Lívia Echternacht Andrade (Universidade Federal de Ouro Preto)

Raquel Franco Cassino, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/05/2025



Documento assinado eletronicamente por **Raquel Franco Cassino, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/05/2025, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0917563** e o código CRC **1BF8BA58**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, com todo carinho, à minha família, especialmente aos meus pais, Alessandro e Beatriz, e à minha irmã Fran, pelo apoio incondicional que me acompanhou em cada etapa desta jornada. Sua paciência, incentivo e compreensão foram fundamentais ao longo de todo esse processo.

Agradeço também aos amigos e amigas que estiveram ao meu lado, compartilhando alegrias, conquistas e desafios. À turma da Geologia 19.1 e às amizades formadas durante o curso, deixo meu reconhecimento. Em especial, agradeço a Hugo, Carol, Laysa e Ana, pela parceria constante e pelas memórias construídas, que levarei para sempre.

À minha orientadora, Raquel, deixo um agradecimento especial pela orientação dedicada, pelos conselhos valiosos e pela confiança depositada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Estendo minha gratidão ao Departamento de Geologia (DEGEO) e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), bem como a todos os professores e professoras que contribuíram para minha formação enquanto estudante e engenheiro geólogo.

Não poderia deixar de mencionar meu fiel companheiro Dino, que esteve ao meu lado durante longas horas de estudo e escrita.

A todos e todas que, de alguma forma, contribuíram para esta caminhada acadêmica, deixo meu mais sincero agradecimento.

## RESUMO

Durante o Quaternário, o clima global passou por intensas variações em escalas milenares, provocando transformações significativas nos ecossistemas terrestres. Compreender como essas mudanças afetaram a vegetação e o regime de fogos nos biomas brasileiros é essencial para avaliar a resiliência e a funcionalidade desses sistemas diante das atuais mudanças ambientais. Este estudo paleoecológico investiga os sedimentos da Lagoa dos Coutos, uma lagoa sazonal localizada na Serra do Gandarela, no Quadrilátero Ferrífero (MG), com o objetivo de reconstruir a dinâmica ambiental desde o final do Pleistoceno até o Holoceno. A área de estudo está situada no ecótono entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, abrigando campos rupestres e florestas estacionais semidecíduas sobre afloramentos ferruginosos, que sustentam sistemas hidrológicos frágeis e ameaçados pela atividade minerária. Os sedimentos da Lagoa dos Coutos constituem um registro contínuo que abrange grande parte do último ciclo glacial-interglacial, fornecendo subsídios valiosos para entender as interações entre clima, vegetação e fogo no sudeste do Brasil. Apesar da relevância ecológica da região, o conhecimento sobre a história da vegetação e seus mecanismos de resposta às oscilações climáticas e ao regime de fogos ainda é limitado. Assim, este trabalho busca preencher essa lacuna, contribuindo para a formulação de estratégias de conservação baseadas em evidências paleoambientais, fundamentais para a proteção de áreas ecologicamente sensíveis como a Serra do Gandarela, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas atuais e futuras.

**Palavras chave:** palinologia; regime de fogos; mudanças climáticas; paleoecologia; Quadrilátero Ferrífero; Quaternário.

## ABSTRACT

During the Quaternary, the global climate underwent intense variations on millennial scales, causing significant transformations in terrestrial ecosystems. Understanding how these changes affected the territory and fire regimes of Brazilian biomes is essential to assess the resilience and functionality of these systems in the face of current environmental changes. This paleoecological study investigates the sediments of Lagoa dos Coutos, a seasonal lake located in the Serra do Gandarela, in the Quadrilátero Ferrífero (MG), with the aim of reconstructing the environmental dynamics from the late Pleistocene to the Holocene. The study area is located in the ecotone between the Atlantic Forest and Cerrado biomes, and is home to *campos rupestres* and semi-deciduous seasonal forests on ferruginous outcrops, which support fragile hydrological systems threatened by mining activity. The sediments of Lagoa dos Coutos represent a continuous record that covers much of the last glacial-interglacial cycle, providing valuable insights into the interactions between climate, vegetation and fire in southeastern Brazil. Despite the ecological relevance of the region, knowledge about the history of vegetation and its response mechanisms to climate oscillations and fire regimes is still limited. Thus, this work seeks to fill this gap, contributing to the formulation of conservation strategies based on paleoenvironmental evidence, which are essential for the protection of ecologically sensitive areas such as Serra do Gandarela, especially in the face of the challenges posed by current and future climate change.

**Key words:** palynology; fire regime; climate change; paleoecology; Quadrilátero Ferrífero; Quaternary.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa dos Biomas e Sistema Costeiro-Marinheiro do Brasil .....	14
Figura 2 - Carta Cronoestratigráfica Internacional.....	20
Figura 3 - Reconstrução das configurações continentais e das principais correntes oceânicas desde o final do Eoceno até os dias atuais .....	21
Figura 4 - Alterações climáticas do Quaternário, evidenciando as variações do nível do mar e as mudanças de temperatura durante os ciclos glaciais (Gunz, Mindel, Riss e Würm) e os períodos interglaciais associados .....	22
Figura 5 - Comparação entre os mecanismos climáticos e as diferenças paleoclimáticas básicas: à esquerda, a situação interglacial atual, e à direita, a potencial situação glacial e glácio-eustática do último período seco pleistocênico, no continente da América do Sul.....	25
Figura 6 - Exemplos de tipos de pólen e esporos: (A) <i>Vaccinium vitis-idaea</i> ; (B) <i>Potamogeton natans</i> ; (C) <i>Tussilago farfara</i> ; (D) <i>Cystopteris fragilis</i> ; (E) <i>Corylus avellana</i> ; (F) <i>Silene dioica</i> .....	28
Figura 7 - Visão diagramática do grão de pólen típico (visão polar, acima, e vista equatorial, abaixo).....	30
Figura 8 - Tipos de abertura, número e posição mais comuns em grãos de pólen ...	31
Figura 9 - Morfologia de esporos de pteridófitas .....	32
Figura 10 - Classificação dos grãos de pólen segundo o padrão de ornamentação da exina.....	32
Figura 11 - Diagrama esquemático das fontes de carvão vegetal em uma bacia hidrográfica.....	34
Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo: Lagoa dos Coutos, Serra do Gandarela (MG) .....	36
Figura 13 - Fotografias da Lagoa dos Coutos, Serra do Gandarela. (A) e (B): Aspectos da Lagoa dos Coutos em períodos de chuvas. (C) Aspectos da Lagoa dos Coutos em períodos de seca.....	37
Figura 14 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.....	40
Figura 15 – Mapa geológico da Serra do Gandarela e seu entorno.....	41

Figura 16 - (A) Mapa geológico da Lagoa dos Coutos e seu entorno, Serra do Gandarela – MG; (B) Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo.....	43
Figura 17 - Imagem do Google Earth Pro evidenciando o relevo no entorno da Lagoa dos Coutos .....	44
Figura 18 - (A) Mapa dos tipos climáticos do Brasil conforme a classificação de Köppen; (B) e (C) Mapas de precipitação média e de temperatura média atmosférica para o estado de Minas Gerais .....	45
Figura 19 - Fitofisionomias do Parque Nacional da Serra do Gandarela .....	47
Figura 20 - (A) Mapa de Biomas de Minas Gerais - BR; (B) Mapa da cobertura vegetal da área de estudo, Serra do Gandarela e seu entorno .....	48
Figura 21 - Mapa hidrográfico da área de estudo, Serra do Gandarela e seu entorno .....	49
Figura 22 - Estrutura do testemunhador e etapas operacionais de amostragem sedimentológica .....	51
Figura 23 - Fotografias do testemunho sedimentar: (A) Sedimento recém-extraído com o <i>Peat Russian Borer</i> ; (B): Sedimento acondicionado em um tubo de PVC para o transporte .....	51
Figura 24 - Diagrama com esquema simplificado para identificação de morfotipos de carvão vegetal.....	56
Figura 25 - Chave de classificação para análise macroscópica da morfologia do carvão sedimentar.....	56
Figura 26 - Perfil estratigráfico do testemunho sedimentar da Lagoa dos Coutos ....	60
Figura 27 – Diagrama do número de macropartículas de carvão vegetal das amostras da sequência sedimentar da Lagoa dos Coutos, representado em função da idade calibrada (anos cal AP) .....	62
Figura 28 (próxima página) - Fotomicrografia dos morfotipos de carvão vegetal identificados nos sedimentos da Lagoa dos Coutos (Tipo: Classificação de Enache & Cumming (2006) / Classificação de Mustaphi & Pisaric (2014)). A: Amostra LC 13-12; B: Amostra LC 51-50; C: Amostra LC 97-96; D: Amostra LC 104-103; E: Amostra LC 118-117; F: Amostra LC 124-123.....	63

Figura 29 (próxima página) – Diagrama de influxo de macropartículas de carvão vegetal da sequência sedimentar da Lagoa dos Coutos. São apresentados o número de partículas por cm<sup>3</sup> e a área total de carvão (mm<sup>2</sup>); o tamanho das partículas, indicado por pontos amarelos (área individual das partículas, em mm<sup>2</sup>) e pontos pretos (área média por amostra); e a razão comprimento/largura (C/L), representada por pontos laranjas (valores individuais) e pontos pretos (valores médios por amostra). Os dados estão plotados em função da idade calibrada (anos cal AP). Adicionalmente, são apresentados dados paleoclimáticos comparativos obtidos de espeleotemas das cavernas Lapa Grande – Lapa Sem Fim (Stríkis *et al.*, 2011; Stríkis *et al.*, 2015), de Botuverá (Cruz *et al.*, 2005) e de testemunhos de gelo da Antártida (Lüthi *et al.*, 2008).

.....68

Figura 30 - Diagrama de porcentagem dos elementos não arbóreos - lianas, ervas, subarbustos e arbustos, e elementos arbóreos (LC 104-103, LC 71-70, LC 23-22 e LC 02-01: amostras polínicas) .....75

Figura 31 - Diagrama de concentração dos elementos não arbóreos - lianas, ervas, subarbustos, arbustos, e plantas aquáticas, e elementos arbóreos (LC 104-103, LC 71-70, LC 23-22 e LC 02-01: amostras polínicas).....76

Figura 32 - Diagrama de concentração dos esporos de pteridófitas, esporos de monilófitas, esporos de briófitas, esporos de algas e Incertae Sedis (LC 104-103, LC 71-70, LC 23-22 e LC 02-01: amostras polínicas).....77

Figura 33 - Representação esquemática da paisagem reconstruída a partir dos conjuntos polínicos das amostras LC 104-103 (60.409 anos cal AP) e LC 71-70 (43.627 anos cal AP) .....82

Figura 34 - Representação esquemática da paisagem reconstruída a partir dos conjuntos polínicos das amostras LC 23-22 (17.508 anos cal AP) e LC 02-01 (343 anos cal AP) .....88

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação da forma dos grãos de pólen de acordo com a razão entre os eixos polar e equatorial.....	29
Quadro 2 – Classificação granulométrica segundo Escala de Wentworth (1922) .....	52
Quadro 3 – Identificação taxonômica dos tipos de grãos de pólen, suas formas de vida e ocorrência típica nos biomas Mata Atlântica e Cerrado .....	71

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	Apresentação .....	14
1.2	Objetivos .....	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	Justificativa.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	Período Quaternário.....	18
2.1.1	Registros climáticos e ambientais.....	21
2.1.2	Quaternário no Hemisfério Sul.....	23
2.1.2.1	Implicações paleoclimáticas .....	25
2.2	Palinologia.....	27
2.2.1	Estudo de grãos de pólen e esporos .....	27
2.2.1.1	Morfologia polínica .....	27
2.2.2	Estudo de macropartículas de carvão vegetal.....	33
2.3	Método de datação por Carbono-14.....	35
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>36</b>
3.1	Serra do Gandarela.....	36
3.1.1	Lagoa dos Coutos.....	37
3.2	Geologia e Geomorfologia .....	38
3.3	Clima .....	45
3.4	Cobertura vegetal.....	46
3.5	Hidrografia.....	49
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>50</b>
4.1	Estudos de referência .....	50
4.2	Coleta do testemunho sedimentar .....	50
4.3	Descrição do testemunho sedimentar .....	52
4.4	Datação das amostras .....	53
4.5	Preparação e análise de amostras.....	53
4.5.1	Macropartículas de carvão vegetal .....	54
4.5.2	Grãos de pólen, esporos e algas .....	54
4.6	Tratamento de dados e interpretação .....	55
4.7	Comparação com dados paleoclimáticos.....	58

<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
5.1	Caracterização sedimentológica .....	59
5.2	Cronologia do testemunho .....	61
5.3	Análise palinológica.....	61
5.3.1	Macropartículas de carvão vegetal .....	61
5.3.2	Grãos de pólen, esporos e algas .....	70
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>78</b>
6.1	Interpretação paleoecológica do registro da Lagoa dos Coutos .....	78
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>91</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>103</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

O Brasil, por sua vasta extensão territorial, abriga uma ampla diversidade de paisagens e ecossistemas tropicais (Ab'Saber, 2003). Esses domínios foram moldados ao longo do tempo pela ação conjunta de fatores climáticos, características geológicas, desenvolvimento geomorfológico, evolução pedológica, características das drenagens e do lençol freático, bem como pela evolução e adaptação da vegetação. No entanto, a evolução destas paisagens não ocorreu de forma contínua. Suas feições e sua distribuição espacial variaram significativamente ao longo do período Quaternário (Ab'Saber, 2006).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004), o Brasil é dividido em seis biomas principais: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal (Figura 1).

Figura 1 - Mapa dos Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2012).

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma das regiões geológicas e ecológicas mais relevantes do Brasil. Desde o século XIX, naturalistas como Richard Burton, Peter Claussen e Eugenius Warming já mencionavam essa região em seus estudos (Carmo, 2010). Entre as áreas que integram o QF, a Serra do Gandarela se destaca como um dos últimos remanescentes bem preservados de ambientes naturais na região. Segundo o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2010), essa serra abriga fragmentos significativos de Mata Atlântica semidecídua, em transição com formações do Cerrado, configurando uma zona de ecótono. É nesse contexto que se insere a Lagoa dos Coutos.

O Quaternário, período geológico mais recente da história da Terra, foi marcado por intensas oscilações climáticas, com sucessivas alternâncias entre períodos glaciais e interglaciais. Associadas a essas flutuações climáticas e ao avanço e recuo das camadas de gelo continentais, ocorreram respostas dramáticas da biota, dos rios, lagos, oceanos e de outros sistemas naturais (Oches, 2009). Nesse contexto, Willis *et al.* (2010) ressaltam a importância dos estudos paleoecológicos, que permitem compreender, em detalhe, a dinâmica dos ecossistemas ao longo do tempo, além de processos ambientais e climáticos que moldaram o equilíbrio ecológico em escalas de séculos a milênios.

A palinologia é a ciência que se dedica ao estudo dos palinomorfos — como grãos de pólen, esporos, e partículas de carvão —, tanto de espécies fósseis quanto atuais, provenientes de material fresco ou de herbário (Salgado-Laboriau, 1984). Quando aplicada à paleoecologia, a palinologia permite, por meio da análise de sedimentos depositados em camadas sucessivas ao longo do tempo, identificar e comparar palinomorfos fósseis com táxons atuais. Essa abordagem possibilita a reconstrução da vegetação pretérita e, conseqüentemente, a inferência sobre as variações climáticas que ocorreram durante o período de deposição dos sedimentos (Salgado-Laboriau, 1973; 1984).

O fogo, por sua vez, é um elemento intrínseco aos ecossistemas terrestres, com uma história tão antiga quanto a das plantas (Bowman *et al.*, 2009). O carvão sedimentar, resultante da queima incompleta da vegetação (Kauffmann, 2009), é amplamente utilizado como indicador de atividade de fogo — um *proxy* paleoambiental —, permitindo investigar a relação entre fogo-clima e fogo-vegetação (Conedera *et al.*, 2009; Remy *et al.*, 2018).

As interações entre clima, vegetação e fogo são dinâmicas e complexas, podendo ser intensamente modificadas por ações antrópicas, como desmatamento, fragmentação de habitats e alteração na disponibilidade de material combustível (Lavorel *et al.*, 2007). A compreensão aprofundada da vegetação pretérita, bem como das sucessões ecológicas e das transformações decorrentes das alterações no meio físico, é fundamental para elucidar os mecanismos que sustentam a origem e a manutenção da biodiversidade. Além disso, oferece subsídios para o desenvolvimento de modelos mais eficazes de conservação e manejo sustentável dos ecossistemas atuais (Salgado-Labouriau, 1984).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Investigar as condições paleoambientais da Serra do Gandarela (MG) durante o Quaternário Tardio, por meio da análise palinológica de sedimentos da Lagoa dos Coutos. O estudo visa compreender os efeitos das mudanças climáticas e dos eventos climáticos associados ao último ciclo glacial-interglacial sobre a vegetação e o regime de fogos na região.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Interpretar a evolução paleoambiental e paleoclimática da região com base nas associações fósseis preservadas nos sedimentos;
2. Caracterizar a dinâmica dos incêndios ao longo do tempo, a partir da análise de macropartículas de carvão vegetal, e relacioná-la às variações climáticas em escalas regional e global;
3. Identificar os principais táxons vegetais presentes nos sedimentos e avaliar suas respostas — quanto à adaptabilidade ou vulnerabilidade — às mudanças climáticas e à ocorrência de incêndios.

## **1.3 Justificativa**

As mudanças climáticas ocorridas ao longo do Quaternário exerceram papel decisivo na transformação da superfície terrestre, modificando o equilíbrio dos processos

geológicos e impactando diretamente a distribuição e o fluxo de matéria e energia nos ecossistemas. Apesar dos avanços científicos, ainda persistem lacunas significativas no entendimento das condições ambientais pretéritas no Brasil, o que reforça a necessidade de investigações paleoambientais mais aprofundadas.

A Lagoa dos Coutos, localizada na Serra do Gandarela (MG), constitui um registro paleoambiental singular do Quaternário. Situada em uma área de notável relevância biológica, geológica, espeleológica e hidrológica no âmbito do Quadrilátero Ferrífero (MG), essa lagoa oferece uma oportunidade ímpar para investigar como as oscilações climáticas e o regime de fogo moldaram a dinâmica da vegetação ao longo do tempo.

A análise dos eventos paleoecológicos e paleoclimáticos registrados durante o último ciclo glacial-interglacial proporciona contribuições valiosas para a compreensão das dinâmicas ambientais regionais. Ademais, esse conhecimento é fundamental para entender como os ecossistemas podem responder às mudanças climáticas atuais e futuras, especialmente em biomas brasileiros altamente ameaçados, como a Mata Atlântica e o Cerrado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Período Quaternário

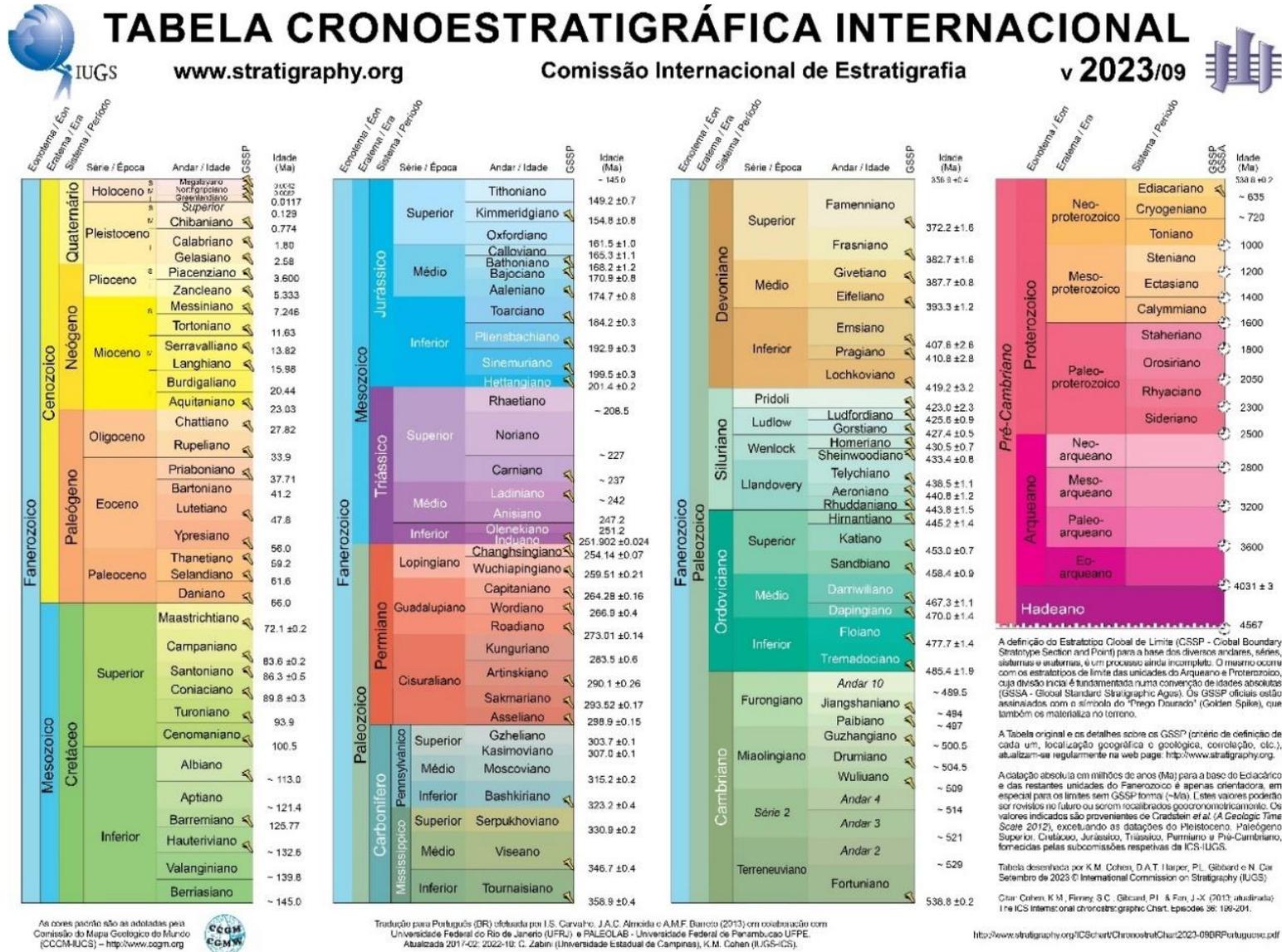
O Quaternário, que se iniciou há aproximadamente 2,58 milhões de anos, é o período mais recente da história da Terra (Figura 2). Compreende um período particularmente dinâmico, caracterizado por grandes mudanças no clima, expansão e contração de mantos de gelo de tamanho continental, subidas e descidas do nível do mar, migrações e extinções da fauna e flora e, não menos importante, o surgimento e a expansão da espécie humana (Maher & Thompson, 1999). De acordo com Head (2019), o Quaternário abrange as épocas geológicas Pleistoceno e Holoceno, que são conhecidas como a “era das glaciações” e a “era recente”, respectivamente.

O Pleistoceno é subdividido em três partes: o Pleistoceno Inferior começou há 2,58 milhões de anos, marcado pelo Estágio Gelasiano e oficializado em 2009 através de um GSSP (Seção e Ponto de Estratotipo de Limite Global) que corresponde a dados isotópicos de oxigênio de sedimentos marinhos e coincidente com a reversão paleomagnética Gauss-Matuyama. O término desta fase é demarcado pelo GSSP da seção estratigráfica de Vrica, na Itália, definido em 2011 para o Estágio Calabriano, iniciado aproximadamente 1,80 milhões de anos. O Pleistoceno Médio é caracterizado pelo Estágio Chibaniano, com cerca de 774 mil anos, e é representado pela seção estratigráfica de Chiba, no Japão, e que se alinha a reversão paleomagnética de Matuyama–Brunhes. Embora o Pleistoceno Superior ainda não tenha uma definição formal estabelecida por GSSP, é reconhecido pelo início do período interglacial anterior ao atual (Holoceno).

Em continuidade às citações de Head (2019), o Holoceno, que se iniciou há 11.700 anos, foi formalmente reconhecido em 2008 por meio de um GSSP definido em um testemunho de gelo do norte da Groenlândia, caracterizando assim o início do Estágio da Groenlândia. Mais tarde, em 2018, essa época geológica foi detalhadamente subdividida, com base em marcadores climáticos significativos que ocorreram há 8.236 e 4.250 anos, em estágios nomeados Estágios Northgrippian e Meghalayan. O estágio Northgrippian, que começou há 8.236 anos, foi também definido por um núcleo de gelo na Groenlândia, enquanto o estágio Meghalayan, iniciado há 4.250 anos, foi determinado por meio de um espeleotema encontrado em Meghalaya, na Índia.

O conceito de Antropoceno, ainda sem uma delimitação exata, tem sido proposto por vários cientistas e se referem ao período que se inicia na última parte do século XVIII, coincidente com a revolução industrial da Europa e seus efeitos globais, conforme registrado em núcleos de gelo e sedimentos de lagos, e continua até hoje (Head, 2019).

Figura 2 - Carta Cronoestratigráfica Internacional

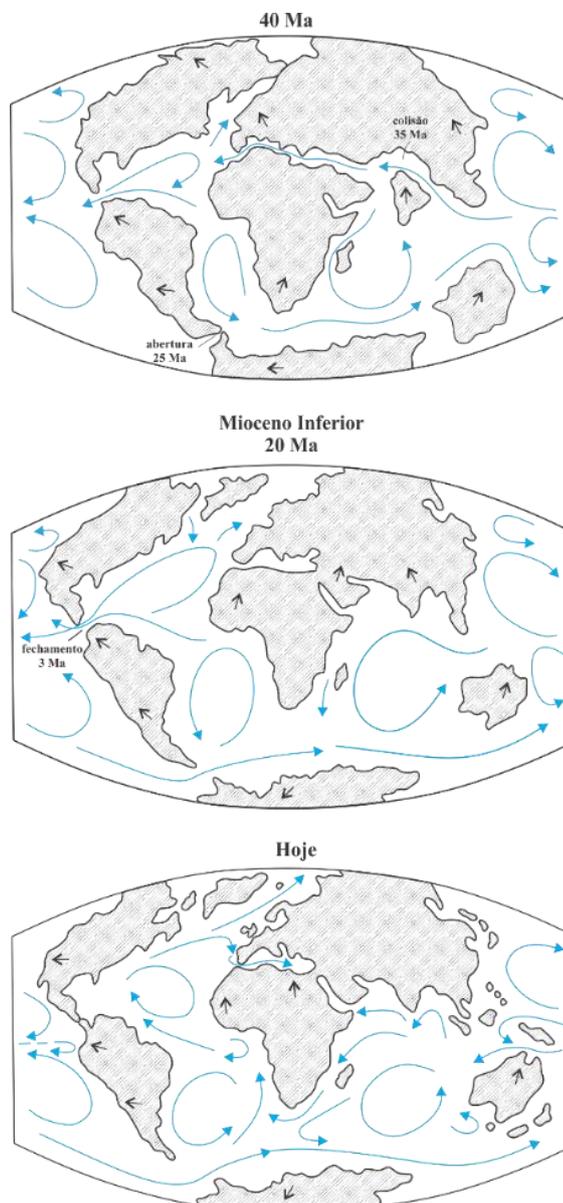


Fonte: Comissão Internacional sobre Estratigrafia (ICS), União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS) (2024).

### 2.1.1 Registros climáticos e ambientais

Segundo Maher & Thompson (1999), o Quaternário pode ser interpretado como a continuidade de um processo de deterioração climática iniciado há cerca de 40 milhões de anos, resultado das mudanças progressivas nas configurações dos continentes e oceanos, conforme ilustrado pela Figura 3. Essa reconfiguração paleogeográfica alterou significativamente os padrões de transferência de calor no planeta, levando ao desenvolvimento gradual de calotas polares e à reorganização da circulação atmosférica.

Figura 3 - Reconstrução das configurações continentais e das principais correntes oceânicas desde o final do Eoceno até os dias atuais

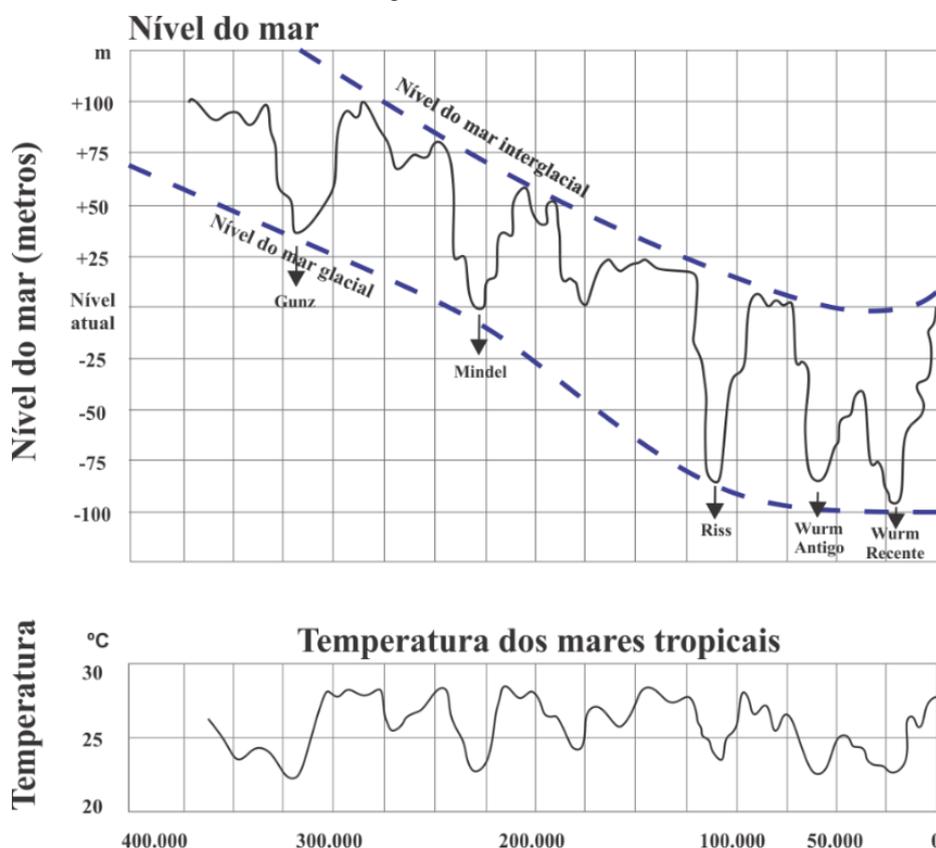


Fonte: Modificado de Williams *et al.* (1998).

A climatologia do Quaternário é caracterizada por sua instabilidade cíclica, alternando entre períodos glaciais e interglaciais com diferentes intensidades, o que confere um padrão oscilatório ao clima (Costa Júnior, 2008). Evidências provenientes de análises de sedimentos oceânicos, isótopos de oxigênio e registros palinológicos de depósitos continentais indicam que, ao longo do Quaternário, ocorreram pelo menos dezesseis eventos glaciais, embora apenas quatro ou cinco deles estejam claramente registrados nos depósitos continentais. Cada glaciação teve, em média, duração de aproximadamente 100 mil anos, intercalada por períodos interglaciais que duraram cerca de 20 mil anos (Salgado-Laboriau, 1994).

Os estudos de Albrecht Penck e Eduard Brückner, sintetizados na obra *Die Alpen im Eiszeitalter* (Os Alpes na Época Glacial), no início do século XX, foram pioneiros na definição da sucessão dos períodos glaciais. De acordo com Foucault (1996), os autores identificaram quatro grandes glaciações, nomeadas, do mais antigo ao mais recente, como Gunz, Mindel, Riss e Würm (Figura 4).

Figura 4 - Alterações climáticas do Quaternário, evidenciando as variações do nível do mar e as mudanças de temperatura durante os ciclos glaciais (Gunz, Mindel, Riss e Würm) e os períodos interglaciais associados



Fonte: Modificado de Fairbridg (1977) *apud* Costa Júnior (2008).

O último grande período glacial, denominado glaciação Würm, corresponde ao evento glacial mais recente da atual era geológica. Esse intervalo é subdividido em três fases principais: Glacial Inferior (cerca de 115.000 a 75.000 anos AP), Pleniglacial (75.000 a 13.000 anos AP), subdividido nas fases Inferior (75.000–60.000 anos AP), Médio (60.000–30.000 anos AP) e Superior (30.000–13.000 anos AP), seguido pelo Glacial Tardio (13.000 a 10.000 anos AP) (van der Hammen, 1991). Durante o Pleniglacial Superior, ocorreu o Último Máximo Glacial (UMG, *Last Glacial Maximum* – LGM), que se estabeleceu por volta de 21.000 a 19.000 anos AP.

Essas oscilações climáticas são resultado da interação entre fatores exógenos e endógenos ao sistema terrestre. Entre os fatores exógenos, destacam-se as variações nos parâmetros orbitais da Terra — excentricidade, obliquidade e precessão —, que modulam a quantidade e a distribuição da radiação solar incidente, conhecidos como ciclos de Milankovitch. Associam-se a esses, fatores exógenos, como mudanças na dinâmica oceânica (temperatura, salinidade e circulação das correntes), variações na composição atmosférica — especialmente na concentração de gases de efeito estufa — e processos geológicos, como tectônica de placas, isostasia e atividade vulcânica, que também exercem influência significativa sobre o sistema climático (Mendonça, 2003).

As transformações no clima e na biosfera ao longo do Quaternário ficaram registradas em diversos *proxies* naturais — indicadores físicos, químicos e isotópicos — preservados em sedimentos, testemunhos de gelo e outros arquivos naturais. A recuperação e análise desses registros permitem reconstruir os padrões, a magnitude, a taxa e os mecanismos das mudanças ambientais e climáticas do passado, contribuindo de forma crucial para a compreensão dos processos atuais e para a projeção de cenários futuros (Maher & Thompson, 1999).

### **2.1.2 Quaternário no Hemisfério Sul**

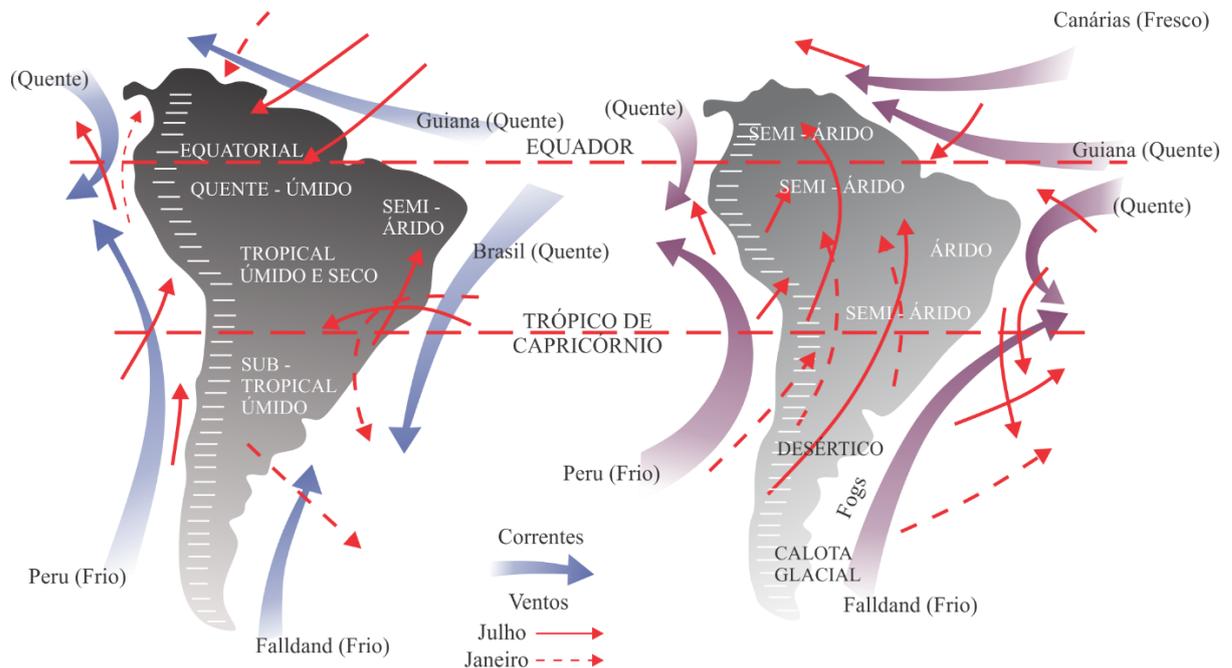
A teoria clássica de Milankovitch propõe que a glaciação Würm teve início no Hemisfério Norte. Contudo, registros paleoclimáticos provenientes do Hemisfério Sul indicam que, de forma quase simultânea, por volta de 115.000 anos AP, também ocorreu um resfriamento significativo nessa porção do globo, resultando no avanço das geleiras nos Andes meridionais, na Patagônia e nas massas de gelo ao redor da

Antártica (Corrêa, 2021). Na América do Sul, os efeitos dessas mudanças manifestaram-se por variações nos níveis dos mares e lagos, transformações nos processos geológicos superficiais — as condições morfogenéticas — e alterações na composição e distribuição da vegetação (Barberi, 2001).

Segundo Heine (1984), embora as variações climáticas no Hemisfério Sul acompanhassem as tendências globais, fatores regionais exerceram forte influência. Coltrinari (1992) ressaltou o papel do Cinturão Orogênico Andino como barreira natural ao longo da costa oeste sul-americana, interferindo nos padrões de circulação atmosférica em escala global. Durante o Último Máximo Glacial (UMG), o desvio das correntes atmosféricas para latitudes mais ao sul provocou uma queda generalizada das temperaturas e aumento da pluviosidade em diversas regiões, afetando diretamente os regimes de precipitação e, conseqüentemente, a biodiversidade (Corrêa, 2021).

No território brasileiro, conforme Ab'Saber (1977), durante os períodos glaciais o fortalecimento das frentes frias oriundas da Antártica favoreceu a expansão de correntes atmosféricas frias em direção ao norte, formando uma faixa semiárida que se estendia do Uruguai até o centro-sul da Bahia (Figura 5). Áreas tropicais anteriormente úmidas ou subúmidas passaram a apresentar características semiáridas e áridas. Em contrapartida, nos períodos interglaciais, as condições climáticas tornavam-se semelhantes às atuais, com aumento da umidade e temperaturas mais elevadas (Ab'Saber, 1977).

Figura 5 - Comparação entre os mecanismos climáticos e as diferenças paleoclimáticas básicas: à esquerda, a situação interglacial atual, e à direita, a potencial situação glacial e glácio-eustática do último período seco pleistocênico, no continente da América do Sul.



Fonte: Modificado de Ab'Saber (1977).

### 2.1.2.1 Implicações paleoclimáticas

As séries temporais baseadas em registros de espeleotemas da América do Sul, especialmente os valores de  $\delta^{18}\text{O}$ , são amplamente utilizadas como indicadores paleoclimáticos. Esses valores permitem reconstruir variações passadas na quantidade de precipitação — um fenômeno conhecido como “efeito da quantidade”. Esse efeito está associado à variabilidade na intensidade das zonas de convergência atmosférica, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o Sistema de Monções da América do Sul (SMAS) (Deininger *et al.*, 2019).

Entre o final do Pleistoceno Superior e o Holoceno, a precipitação na América do Sul foi controlada principalmente pela insolação de verão, modulada por ciclos de precessão orbital, em interação com a ZCIT e o SMAS. Outros sistemas também exerceram influência, embora em menor escala, como os ciclones do Atlântico Sul (SACs), os ventos de oeste do Hemisfério Sul (SHWW) e as temperaturas da superfície do mar (SST) dos oceanos Atlântico e Pacífico. Além disso, eventos climáticos episódicos do Hemisfério Norte — como os eventos *Heinrich* e *Bond*, bem

como a Pequena Idade do Gelo — também afetaram a intensidade do SMAS (Deininger *et al.*, 2019).

Entretanto, os registros de  $\delta^{18}\text{O}$  obtidos em espeleotemas do Brasil são pouco sensíveis às variações sazonais de insolação, sendo diretamente influenciados pela variabilidade associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um dos principais sistemas meteorológicos vinculados ao Sistema de Monções da América do Sul (SMAS). As flutuações nos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  ao longo do território brasileiro refletem alterações na origem da umidade atmosférica: valores mais negativos indicam maior contribuição de umidade proveniente da Bacia Amazônica — associada às chuvas de monção, predominantes no verão —, enquanto valores mais positivos refletem maior influência do Atlântico Sul, vinculada a precipitações de caráter invernal (Deininger *et al.*, 2019).

Registros de  $\delta^{18}\text{O}$  em espeleotemas das cavernas Lapa Grande–Lapa Sem Fim (Stríkis *et al.*, 2011; Stríkis *et al.*, 2015), situadas no centro-leste do país, e da caverna Botuverá (Cruz *et al.*, 2005), no sul do Brasil, documentam variações na precipitação em escalas centenárias, além de eventos de curta duração. Bernal *et al.* (2016) identificaram uma covariância geral entre os registros de paleoprecipitação dessas localidades, associada à intensificação do SMAS. No entanto, também foram observados episódios em que esses registros apresentaram tendências opostas, interpretados como reflexo de deslocamentos meridionais (para norte ou sul) da ZCAS.

Deininger *et al.* (2019) ressaltam que as reconstruções paleoclimáticas baseadas em  $\delta^{18}\text{O}$  são fundamentais para compreender a resposta de ecossistemas biodiversos — como a Floresta Amazônica, o Pantanal, a Caatinga, o Cerrado e a Mata Atlântica — às mudanças hidrológicas do passado. Nessa mesma linha, Cassino *et al.* (2023) demonstraram que, no ecótono Cerrado–Mata Atlântica, a precipitação foi a principal variável associada às flutuações passadas na cobertura vegetal e na atividade do fogo.

## **2.2 Palinologia**

A palinologia é a ciência responsável pelo estudo dos palinomorfos, elementos orgânicos microscópicos como grãos de pólen de angiospermas e gimnospermas, esporos de pteridófitas e fungos, além de algas, dinoflagelados, foraminíferos, acritarcos, e partículas de carvão, entre outros. Esses microfósseis podem ser encontrados no ar, em sedimentos, rochas sedimentares, solos ou em qualquer matriz orgânica ou inorgânica que os preserve (Salgado-Labouriau, 1961, 1973, 1994, 2001).

### **2.2.1 Estudo de grãos de pólen e esporos**

De acordo com Bradley (1999), os grãos de pólen desempenham um papel fundamental na reprodução das plantas, como angiospermas e gimnospermas, ao transportarem o material genético masculino necessário à fecundação até o receptor feminino da mesma espécie vegetal. Por sua vez, os esporos são estruturas reprodutivas assexuadas produzidas por pteridófitas e briófitas (Absy, 1975; Absy & Servant, 1993).

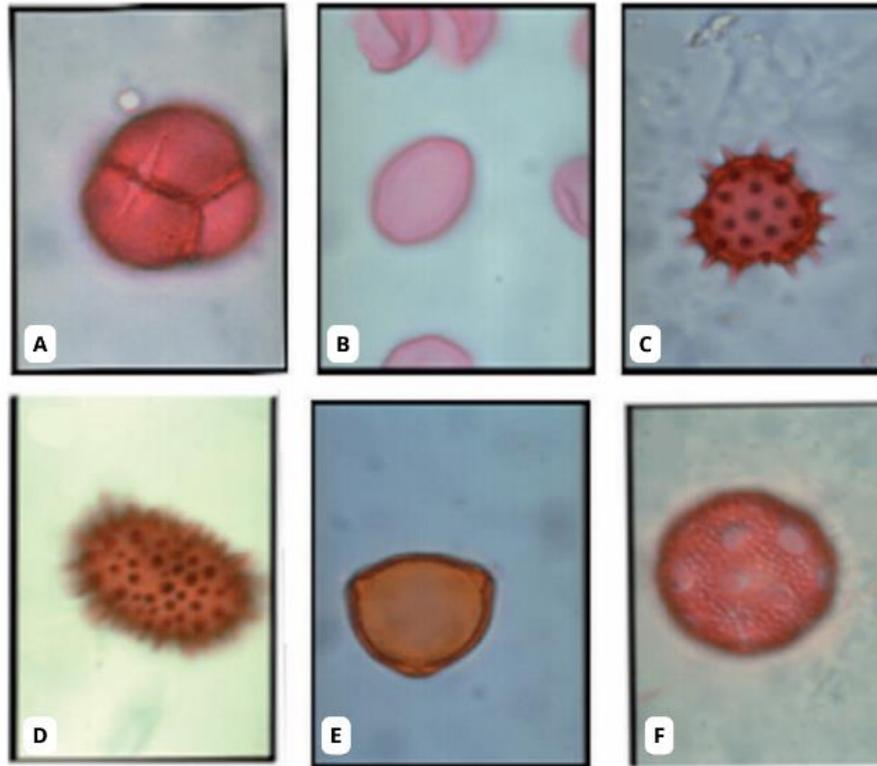
Na atmosfera, o pólen é transportado e disperso pelo vento, sendo amplamente distribuído de forma relativamente uniforme. Os registros fósseis de pólen são encontrados em diversos ambientes sedimentares, como mares, lagos, lagoas, turfeiras, solos e camadas de húmus (Allison *et al.*, 1986).

Bradley (1999) destaca que a análise polínica permite a reconstrução paleoecológica devido a quatro características principais dos grãos de pólen: (1) morfologia específica para cada gênero ou espécie; (2) produção em grande quantidade, com ampla dispersão, especialmente pelo vento; (3) resistência à decomposição em certos ambientes sedimentares; e (4) capacidade de refletir a composição da vegetação no momento da deposição, fornecendo informações sobre as condições ambientais passadas.

#### **2.2.1.1 Morfologia polínica**

A diversidade morfológica dos grãos de pólen e esporos, aliada à elevada resistência da exina — a parede externa — permite sua identificação e classificação taxonômica (Salgado-Labouriau, 2001). A Figura 6 apresenta exemplos dessa diversidade.

Figura 6 - Exemplos de tipos de pólen e esporos: (A) *Vaccinium vitis-idaea*; (B) *Potamogeton natans*; (C) *Tussilago farfara*; (D) *Cystopteris fragilis*; (E) *Corylus avellana*; (F) *Silene dioica*



Fonte: Adaptado de Seppä (2013).

A identificação dos grãos de pólen baseia-se na análise de um conjunto de características morfológicas, conforme descrito por Salgado-Laboriau (2001). Entre os principais critérios utilizados, destacam-se o número de aberturas, a forma geral do grão, a presença e o tipo de ornamentações na parede externa, além das dimensões observadas nas vistas polar e equatorial.

A relação entre o comprimento do eixo polar (P) e o do eixo equatorial (E), expressa pela fórmula  $P/E$ , é um parâmetro fundamental na classificação da morfologia polínica. Essa relação permite distinguir diferentes formas, conforme ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação da forma dos grãos de pólen de acordo com a razão entre os eixos polar e equatorial

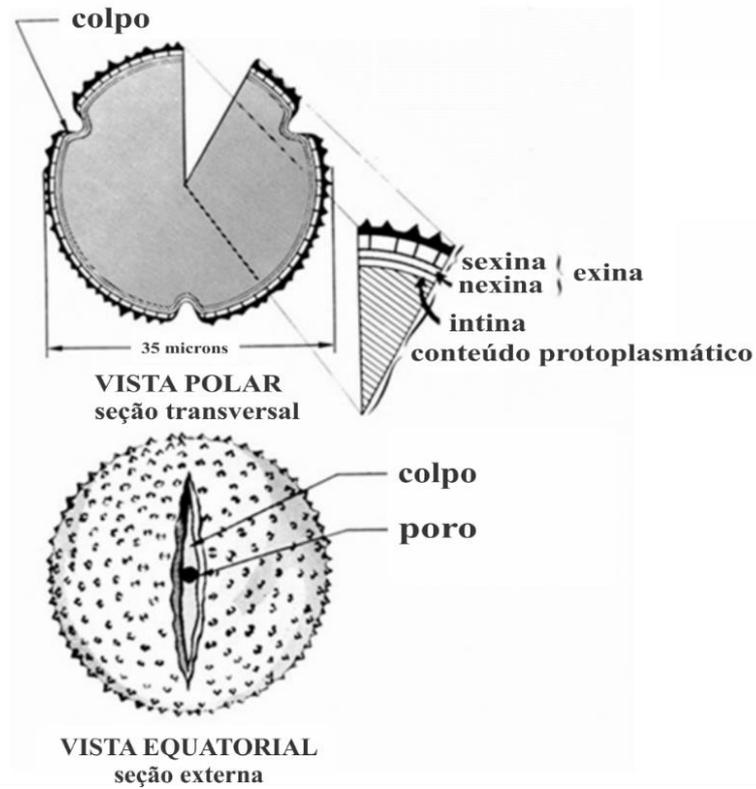
<b>RELAÇÃO P/E</b>	<b>DENOMINAÇÃO DA FORMA</b>
0,50	Peroblato
0,50 - 0,74	Oblato
0,75 - 0,87	Suboblato
0,88 - 0,99	Oblato-esferoidal
1,00	Esférico
1,01 - 1,14	Prolato-esferoidal
1,15 - 1,33	Subprolato
1,34 - 2,00	Prolato
2,00	Perprolato

Fonte: Adaptado de Salgado-Laboriau (1973).

Os grãos de pólen possuem uma parede composta por duas camadas principais: a exina, formada por esporopolenina — altamente resistente —, e a intina, composta por celulose. Durante a fossilização, apenas a exina se preserva, sendo essa camada essencial para a identificação, devido às suas ornamentações características (Moore *et al.*, 1991). A exina subdivide-se em duas subcamadas: a sexina, que constitui a porção mais externa e geralmente apresenta ornamentações, e a nexina, camada interna que não possui ornamentações (Dias, 2006).

Outro critério morfológico relevante é o tipo de abertura presente na parede do grão de pólen. Segundo Moore *et al.* (1991), essas aberturas podem ser classificadas em como: poros, de formato arredondado e pouco alongado, e colpos, estruturas alongadas e estreitas. Com base na presença dessas estruturas, os grãos de pólen podem ser classificados como porados, quando possuem apenas poros; colpados, quando apresentam apenas colpos; ou colporados, quando exibem ambos os tipos de aberturas. A Figura 7 ilustra as principais vistas e características morfológicas dos grãos de pólen.

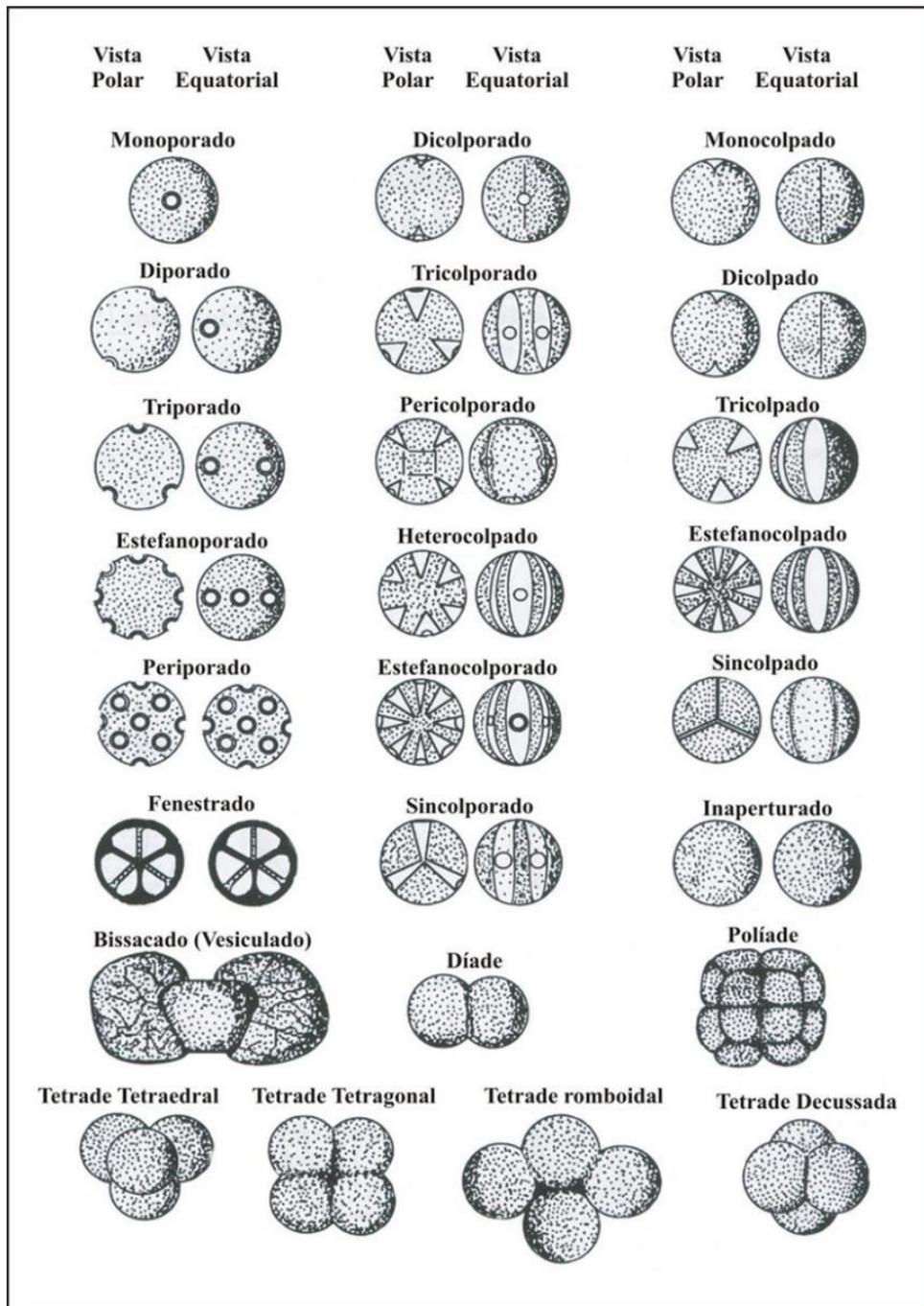
Figura 7 - Visão diagramática do grão de pólen típico (visão polar, acima, e vista equatorial, abaixo)



Fonte: Adaptado de Traverse (2007).

O número, a posição e as características das aberturas dos grãos de pólen são indicadas por prefixos como *mono*, *di*, *tri*, *tetra* ou *poli*. Esses prefixos são combinados com os termos *porado*, *colpado* ou *colporado*, os quais descrevem o tipo de abertura. Quando as aberturas estão distribuídas ao longo do diâmetro equatorial do grão, utiliza-se o prefixo *zono*. Por outro lado, quando estão distribuídas por toda a superfície, o prefixo utilizado é *panto* (Dias, 2006). A Figura 8 ilustra essa terminologia.

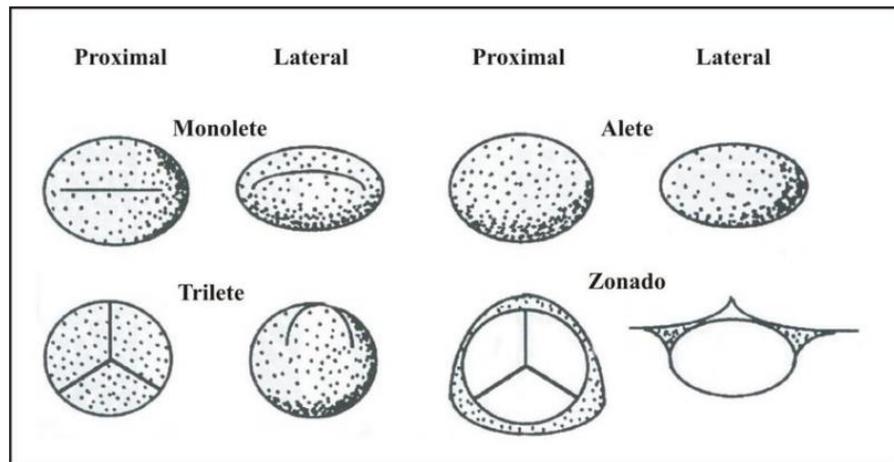
Figura 8 - Tipos de abertura, número e posição mais comuns em grãos de pólen



Fonte: Adaptado de Colinvaux *et al.* (1999).

Os esporos não apresentam divisão em sexina e nexina, tampouco possuem aberturas. Entretanto, podem apresentar marcas chamadas trilete ou monolete, resultantes do contato entre os grãos durante sua formação em tetráde. Quando essas marcas estão ausentes, os esporos são denominados aletes (Figura 9) (Salgado-Labouriau, 2007).

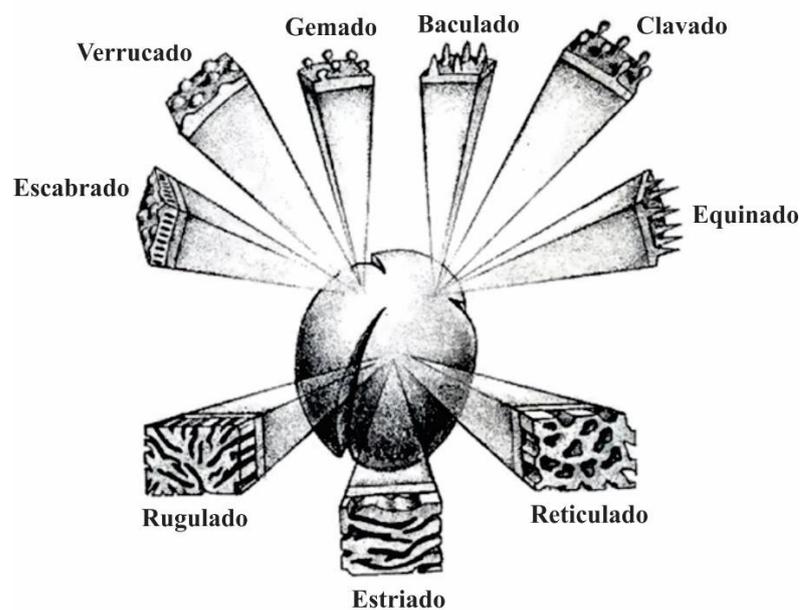
Figura 9 - Morfologia de esporos de pteridófitas



Fonte: Adaptados de Colinvaux *et al.* (1999).

A superfície dos grãos de pólen e dos esporos pode apresentar diferentes tipos de ornamentação, como padrões estriados, reticulados, lisos, perfurados, espinhosos, verrucosos ou pilosos (Figura 10). De modo geral, grãos com ornamentações mais elaboradas estão associados à polinização realizada por insetos, enquanto aqueles com superfícies lisas ou de ornamentação simples são típicos de espécies cuja dispersão ocorre pelo vento ou pela água (Bauermann *et al.*, 2002).

Figura 10 - Classificação dos grãos de pólen segundo o padrão de ornamentação da exina



Fonte: Modificado de Kapp *et al.* (2000).

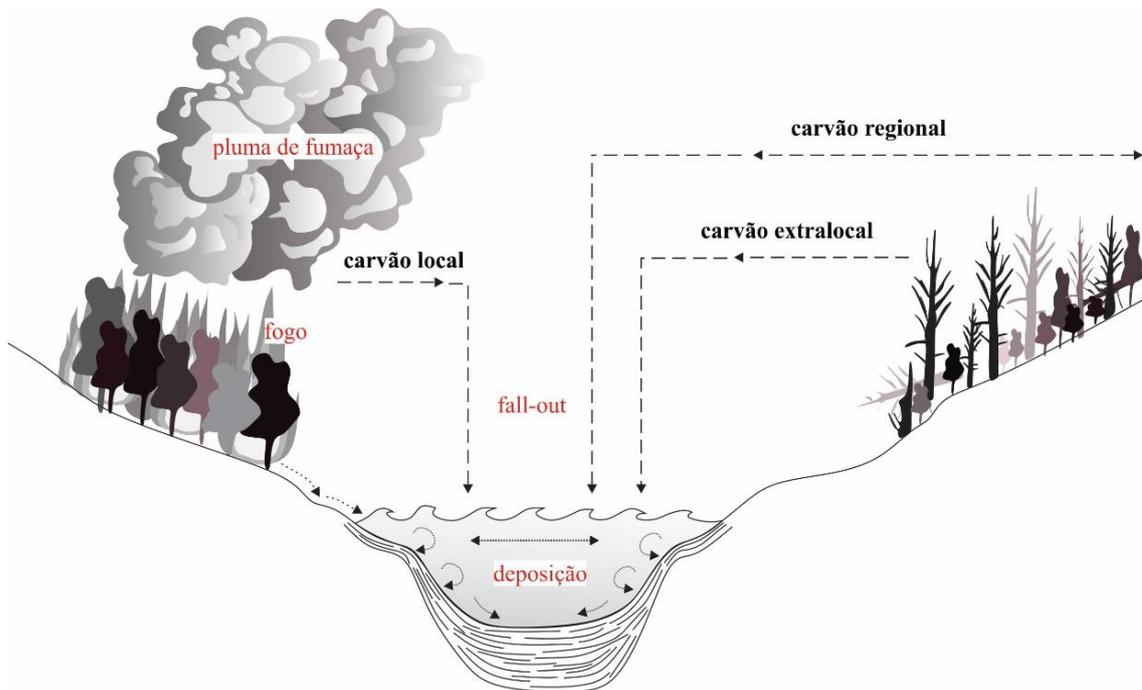
### 2.2.2 Estudo de macropartículas de carvão vegetal

Embora, por muito tempo, o fogo tenha sido considerado uma força destrutiva e incontrolável, atualmente é reconhecido como um componente ecológico intrínseco e essencial, que exerce influência sobre a maioria dos ecossistemas terrestres (McLauchlan *et al.*, 2020).

O carvão vegetal, um resíduo sólido rico em carbono, é produzido pela pirólise da biomassa vegetal, processo que ocorre sob temperaturas entre 250 e 550°C, na ausência ou com acesso limitado ao oxigênio (Vaughan & Nichols, 1995; Ward, 2001). A depender do tamanho e da densidade dos fragmentos de carvão, esses podem ser transportados por via aérea desde alguns metros até dezenas de quilômetros (Clark & Petterson, 1997; Pisaric, 2002).

As fontes de carvão vegetal depositado em um ambiente sedimentar podem ocorrer em diferentes escalas espaciais, classificadas como incêndios regionais (distantes), extralocais (próximos, porém fora da bacia hidrográfica) ou locais (dentro da bacia hidrográfica), conforme descrito por Whitlock & Larsen (2001). Essa variação espacial influencia diretamente o padrão de deposição, seja em depósitos terrestres ou em bacias hidrográficas, como ilustrado na Figura 11. De acordo com os autores, com base em Clark & Petterson (1997), partículas de carvão com dimensões superiores a 1.000  $\mu\text{m}$  tendem a ser transportadas por curtas distâncias a partir do foco do incêndio, enquanto aquelas menores que 100  $\mu\text{m}$  possuem maior potencial de transporte por longas distâncias, podendo alcançar altitudes elevadas.

Figura 11 - Diagrama esquemático das fontes de carvão vegetal em uma bacia hidrográfica



Fonte: Modificado de Whitlock & Larsen (2001).

O registro paleoambiental de carvão vegetal constitui um indicador direto da ocorrência de incêndios vegetais, tanto em períodos atuais quanto pretéritos. Além disso, tem se mostrado relevante nas discussões sobre a evolução dos biomas terrestres (Kauffmann, 2009). O fogo também mantém interações diretas com o clima, influenciando-o por diferentes mecanismos como a emissão de gases-traço e precursores de aerossóis que afetam a composição atmosférica e o balanço radiativo, além da liberação de  $\text{CO}_2$  para o ciclo global do carbono (Galanter *et al.*, 2000; van der Werf *et al.*, 2004).

As interações entre clima, vegetação e regime de fogos são complexas, especialmente quando acrescidas dos efeitos das atividades humanas. Segundo Lavorel *et al.* (2007), essas influências ocorrem tanto por meio de intervenções diretas, como a ignição e a supressão de incêndios, quanto de forma indireta, como resultado de práticas que modificam a paisagem e alteram a disponibilidade de combustível. De acordo com Souza (2014), os incêndios também promovem a fragmentação da paisagem, impactando tanto a composição quanto a estrutura da vegetação local.

### 2.3 Método de datação por Carbono-14

O carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ) é um isótopo radioativo de ocorrência natural, formado na atmosfera a partir da interação entre raios cósmicos e átomos de nitrogênio ( $^{14}\text{N}$ ). Uma vez produzido, o  $^{14}\text{C}$  se incorpora ao ciclo do carbono, sendo absorvido pelos organismos vivos juntamente com os isótopos estáveis  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ . No entanto, após a morte dos organismos, cessam as trocas com o ambiente, e o  $^{14}\text{C}$  presente em seus tecidos passa a decair de forma contínua, sem reposição (Scheel-Ybert, 1999).

Segundo Bradley (1999), a datação por carbono-14 tem sido a técnica mais útil para os estudos do Quaternário recente. Sua ampla aplicabilidade permite o uso em diferentes tipos de materiais orgânicos, como turfa, madeira, ossos, conchas, sedimentos marinhos e lacustres, entre outros. O intervalo de tempo abrangido por esse método compreende a um período marcado por grandes transformações ambientais globais, cuja compreensão detalhada seria inviável sem o suporte de um controle cronológico preciso (Bradley, 1999).

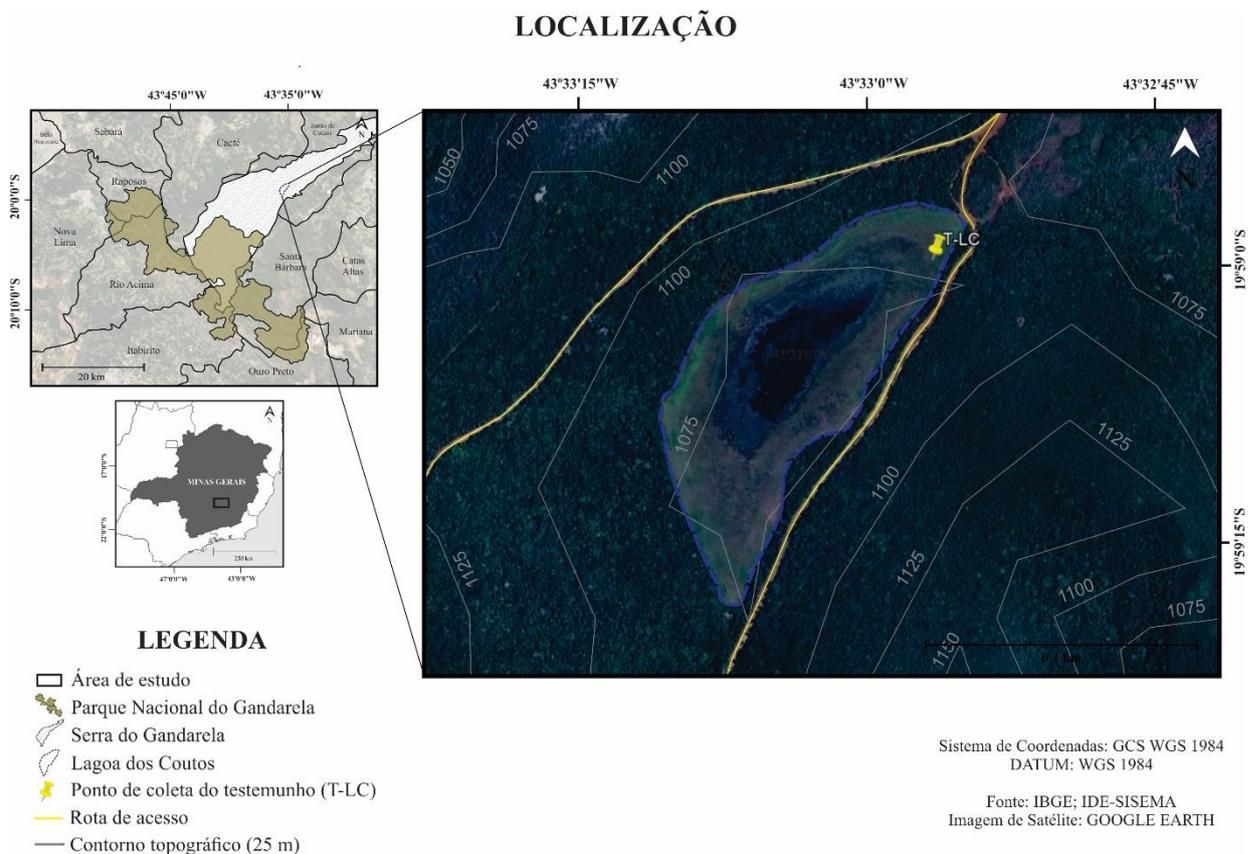
O alcance temporal da datação por  $^{14}\text{C}$  é determinado pela sua meia-vida, estimada em 5.730 anos. Isso significa que, após esse intervalo, a quantidade original de  $^{14}\text{C}$  em um organismo morto é reduzida à metade; após 11.460 anos, restará 25%, e assim sucessivamente. A idade de uma amostra é, portanto, calculada pela comparação entre a radioatividade específica  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  e a de um padrão de referência (Scheel-Ybert, 1999). A suposição básica desse método é que o conteúdo isotópico de  $^{14}\text{C}$  presentes nos sedimentos refletem a composição isotópica da biota viva no momento da deposição (Kaland *et al.*, 1984).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Serra do Gandarela

A Serra do Gandarela está localizada no estado de Minas Gerais, na porção norte do Quadrilátero Ferrífero (QF), abrangendo parcialmente os municípios de Barão de Cocais, Itabirito, Caeté, Rio Acima e Santa Bárbara, todos situados na Região Metropolitana de Belo Horizonte (Figura 12). Em outubro de 2014, foi criado o Parque Nacional da Serra do Gandarela, com área total de 31.284 hectares. De acordo com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2010), o principal objetivo da criação do PARNA é preservar o último fragmento de ecossistemas naturais em bom estado de conservação dentro do QF.

Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo: Lagoa dos Coutos, Serra do Gandarela (MG)



Fonte: Autor (2025).

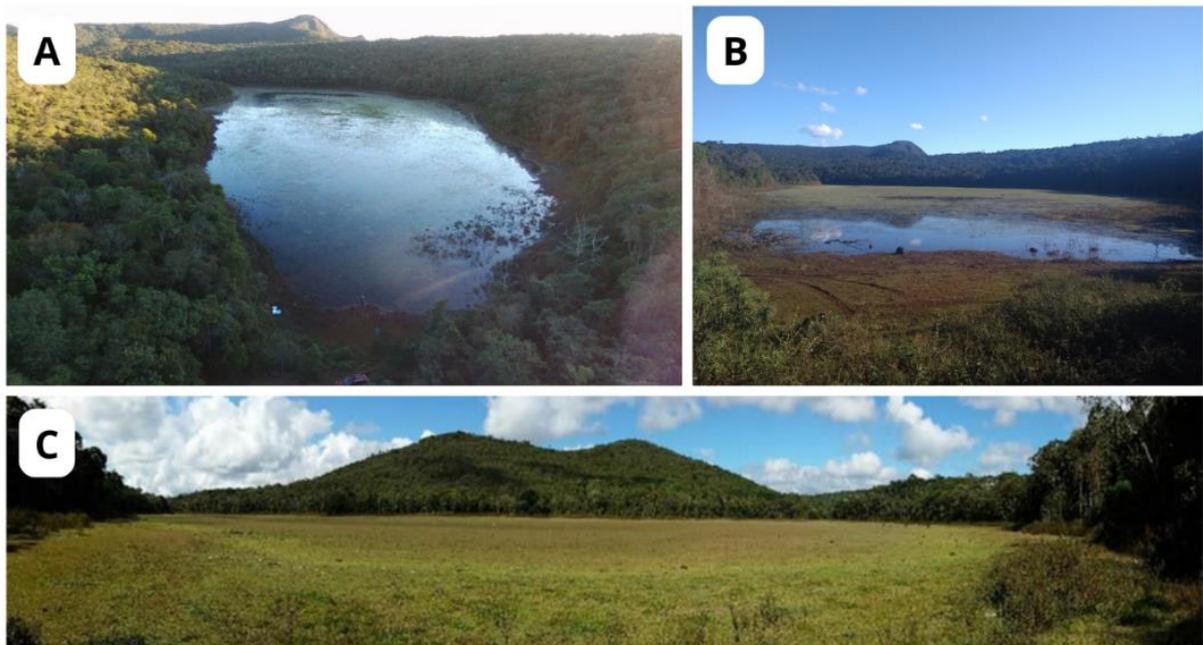
A Serra do Gandarela abriga um geossistema notável, caracterizado pela presença de cangas e itabiritos, além de remanescentes de Mata Atlântica semidecidual,

campos rupestres sobre canga e quartzito, e formações savânicas típicas do bioma Cerrado. A região também se destaca como uma zona de recarga de aquíferos (ICMBio, 2010). Entre seus elementos naturais mais relevantes, destaca-se a presença de lagoas temporárias de altitude, como a Lagoa dos Coutos (Figura 13), que configuram ambientes raros e de elevado valor ecológico.

### 3.1.1 Lagoa dos Coutos

A Lagoa dos Coutos ( $19^{\circ}59'6.54''S$ ;  $43^{\circ}33'4.75''W$ ) é uma lagoa de caráter temporário (Figura 13). Esse tipo de lagoa se forma sazonalmente em resposta à precipitação e à umidade relativa do ar, conforme descrito por Williams (2006). Embora tenha sido incluída na proposta inicial de criação do Parque Nacional da Serra do Gandarela, acabou sendo excluída dos limites finais da unidade de conservação.

Figura 13 - Fotografias da Lagoa dos Coutos, Serra do Gandarela. (A) e (B): Aspectos da Lagoa dos Coutos em períodos de chuvas. (C) Aspectos da Lagoa dos Coutos em períodos de seca



Fonte: (A) e (B): Autor (2025). (C) Retirado de Leibowitz (2016).

A variação do nível da água da Lagoa dos Coutos está diretamente condicionada ao regime pluviométrico local. No período entre 5 de janeiro de 2012 e 19 de junho de 2013, sua dinâmica foi monitorada por Dias (2014), que observou que, durante a

estação chuvosa, a profundidade média da lagoa atingiu cerca de 1 metro. Entretanto, ao final do monitoramento, em junho, esse valor havia reduzido para 0,58 metro. No auge da estação seca, entre setembro e novembro, a coluna d'água desapareceu completamente, evidenciando a forte dependência da lagoa em relação à sazonalidade climática.

A Lagoa dos Coutos possui uma lâmina d'água com área aproximada de 10,53 hectares, situada a uma altitude de 1.072 metros acima do nível do mar. Durante as estações chuvosas, a temperatura da água variou entre 18,0 °C e 29,9 °C, com média de 24,6 °C. O pH apresentou valores entre 4,77 e 7,46, indicando uma acidez variável. A concentração de oxigênio dissolvido oscilou de 6,88 a 13,74 mg/L, enquanto a condutividade elétrica manteve-se baixa, entre 70 e 120  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Carmo, 2010; Dias, 2014).

No que se refere aos sedimentos, Silva (2018) analisou a matéria orgânica até 10 cm de profundidade, identificando uma concentração média de 560,6 g/kg. Por sua vez, Leibowitz (2016) apontou que a taxa de sedimentação na Lagoa dos Coutos é extremamente lenta, variando entre 500 e 900 anos para cada centímetro de sedimento acumulado.

Atualmente, a lagoa sofre impactos decorrentes de atividades antrópicas. Entre os principais fatores estão a deposição de poeira oriunda da abertura e circulação em estradas não pavimentadas associadas à atividade minerária na bacia de drenagem. Somam-se a esses impactos o possível enriquecimento de nutrientes e a redução da vegetação aquática (macrófitas), atribuídos tanto à prática de aquicultura de tilápia durante os períodos de cheia quanto à presença de gado equino na área durante a estação seca (Leibowitz, 2016).

### **3.2 Geologia e Geomorfologia**

O Quadrilátero Ferrífero (QF) constitui uma das regiões mais estudadas do Brasil sob a perspectiva geológica. Como resultado, inúmeros trabalhos abordando aspectos da estratigrafia, geologia estrutural, geologia econômica, geoquímica e geocronologia foram desenvolvidos, contribuindo significativamente para o entendimento da evolução geológica do QF e de suas adjacências (Chemale Jr. *et al.*, 1991).

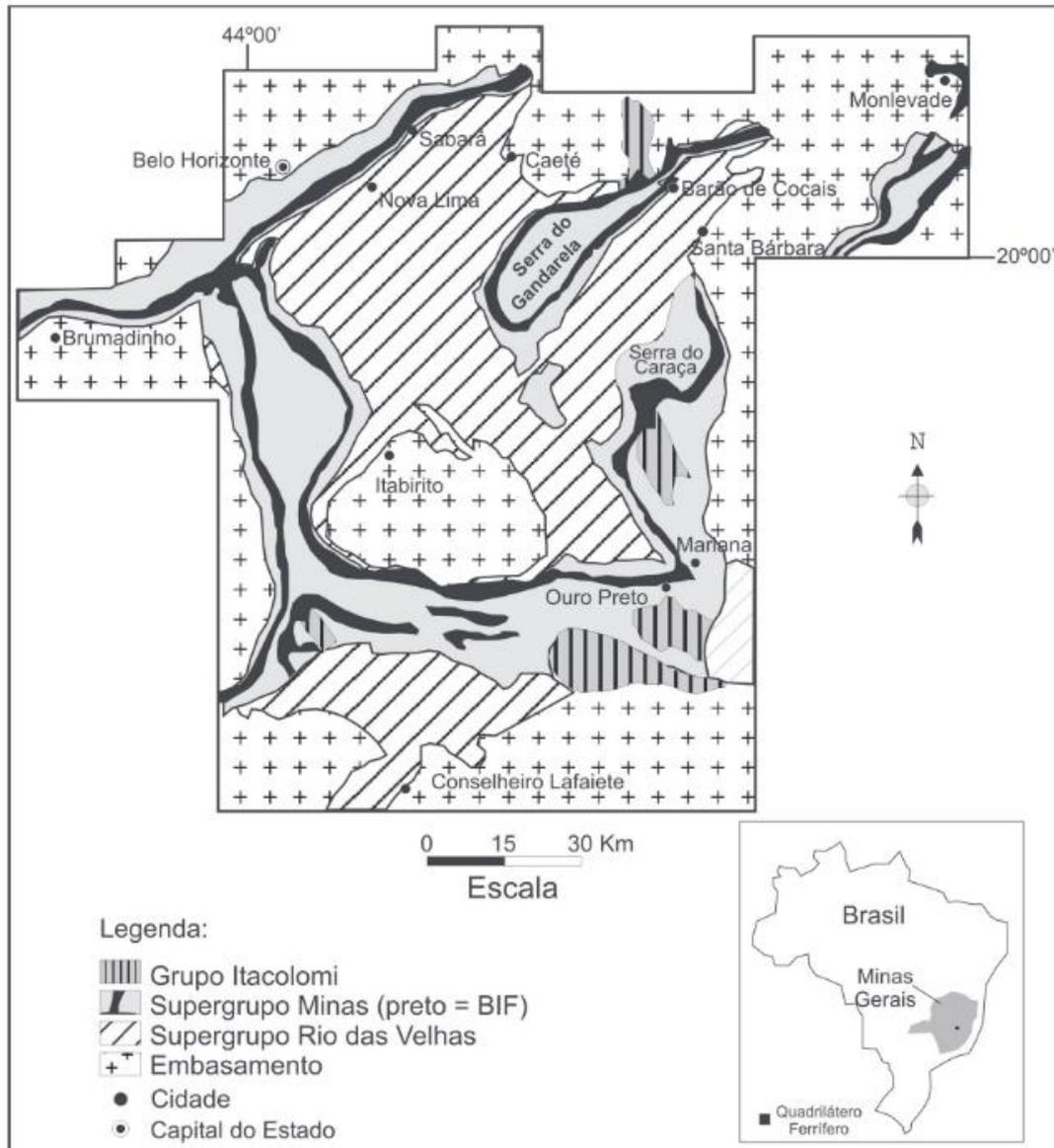
Segundo Alkmim e Marshak (1998), o Quadrilátero Ferrífero é formado por quatro principais unidades litoestratigráficas (Figura 14):

1. Embasamento Cristalino Arqueano: Constituído por complexos gnáissicos e migmatíticos com idades entre 2,9 e 3,2 Ga (Teixeira, 1985), além de granitóides de composição tonalítica-trondhjemítica-granodiorítica (TTG) (Hippertt & Davis, 2000);
2. Supergrupo Rio das Velhas: Cinturão de *greenstone* arqueano, composto por rochas metavulcânicas e metassedimentares (Alkmim & Marshak, 1998);
3. Supergrupo Minas: Formado entre o Neoarqueano e o Paleoproterozoico, compreende rochas metassedimentares depositadas em discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas (Farina *et al.*, 2015).
4. Grupo Itacolomi: Formado por quartzitos e conglomerados polimíticos (Dorr, 1969; Farina *et al.*, 2015).

Adicionalmente, Endo *et al.* (2019) inserem o Grupo Itacolomi no contexto do Supergrupo Estrada Real, caracterizado pela presença de rochas metassedimentares clásticas e químicas, além de metavulcânicas. Esses autores também identificam o Grupo Barbacena, que, embora semelhante ao Estrada Real, distingue-se pela composição das rochas metavulcânicas. Também se destaca, na região, o Supergrupo Espinhaço, composto predominantemente por rochas metassedimentares clásticas.

O arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero é altamente complexo, sendo tema de longos debates na comunidade científica. Alkmim e Marshak (1998) propuseram um modelo de domos e quilhas para descrever a configuração tectônica dos terrenos mesoarqueanos. Entretanto, Endo *et al.* (2019) propõem uma interpretação alternativa, com base em um modelo estrutural dominado por dobras de múltiplas gerações, que resultaram na formação de um sistema de *nappes*.

Figura 14 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero

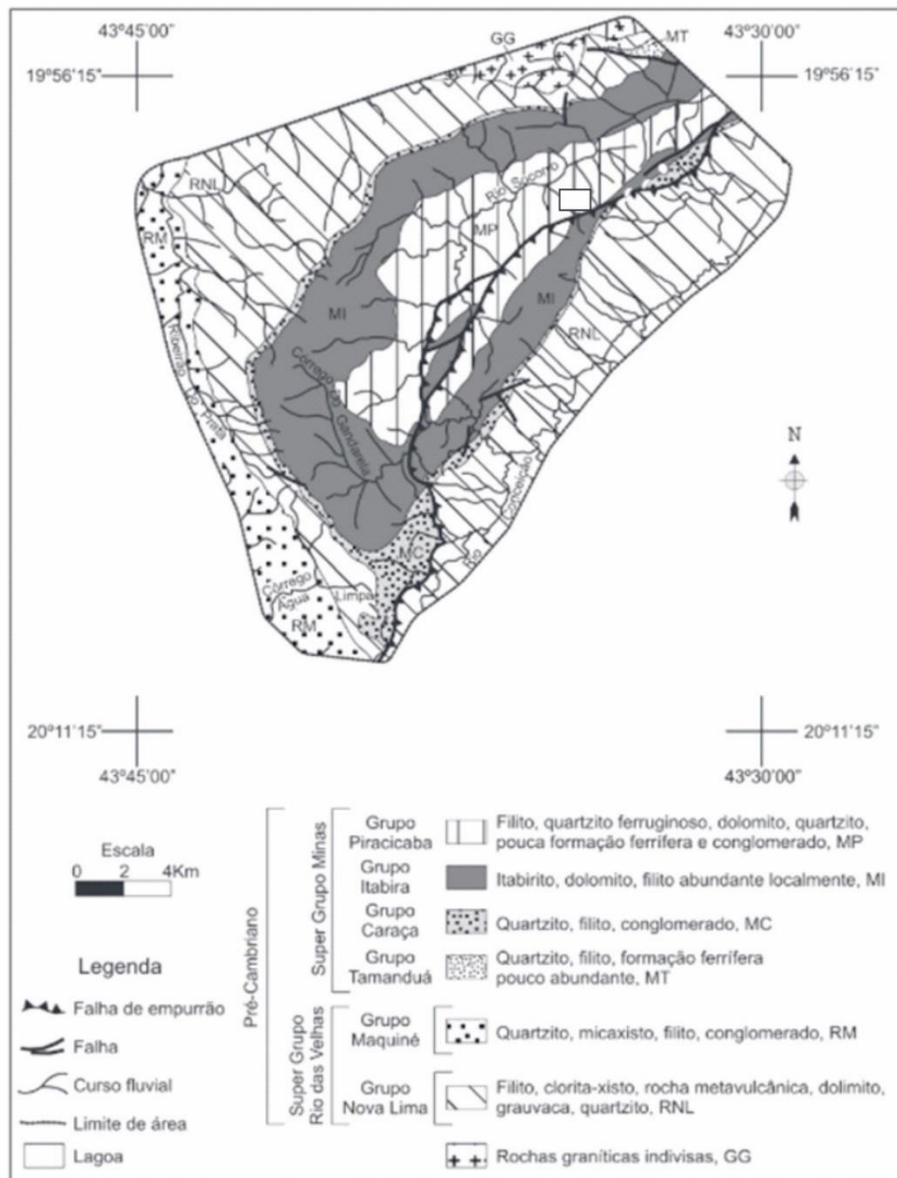


Fonte: Retirado de Lamounier (2011) adaptado de Dorr (1969).

A Serra do Gandarela e seu entorno (Figura 15) são dominados pelas rochas dos Supergrupos Minas e Rio das Velhas (Endo & Rocha Filho, 2003). O Supergrupo Rio das Velhas, descrito por Alkmim e Marshak (1998), sobrepõe-se ao embasamento cristalino arqueano e é constituído por komatiitos, basaltos, lavas riolíticas e rochas sedimentares. Este supergrupo é subdividido em dois grupos: Nova Lima (inferior) e Maquiné (superior). O Grupo Nova Lima compreende formações ferríferas bandadas (BIFs), filitos, clorita-xisto, rochas metavulcânicas e dolomitos, enquanto o Grupo Maquiné é predominantemente composto por quartzitos, xistos, conglomerados, sericita-xisto, clorita-xisto e filitos.

As rochas do Supergrupo Minas, que se sobrepõem ao Supergrupo Rio das Velhas, são predominantes na porção central da área de estudo e estão organizadas estruturalmente pelo Sinclinal Gandarela. A base do Supergrupo Minas é representada pelo Grupo Caraça, composto por metaconglomerados, quartzitos e filitos. Sobre este, encontra-se o Grupo Itabira, que engloba as formações ferríferas bandadas (Formação Cauê) e as rochas carbonáticas (Formação Gandarela). O Grupo Itabira é sobreposto pelo Grupo Piracicaba, composto por rochas clásticas depositadas em ambientes deltaicos e plataformais, intercaladas com lentes de rochas carbonáticas (Alkmim & Marshak, 1998).

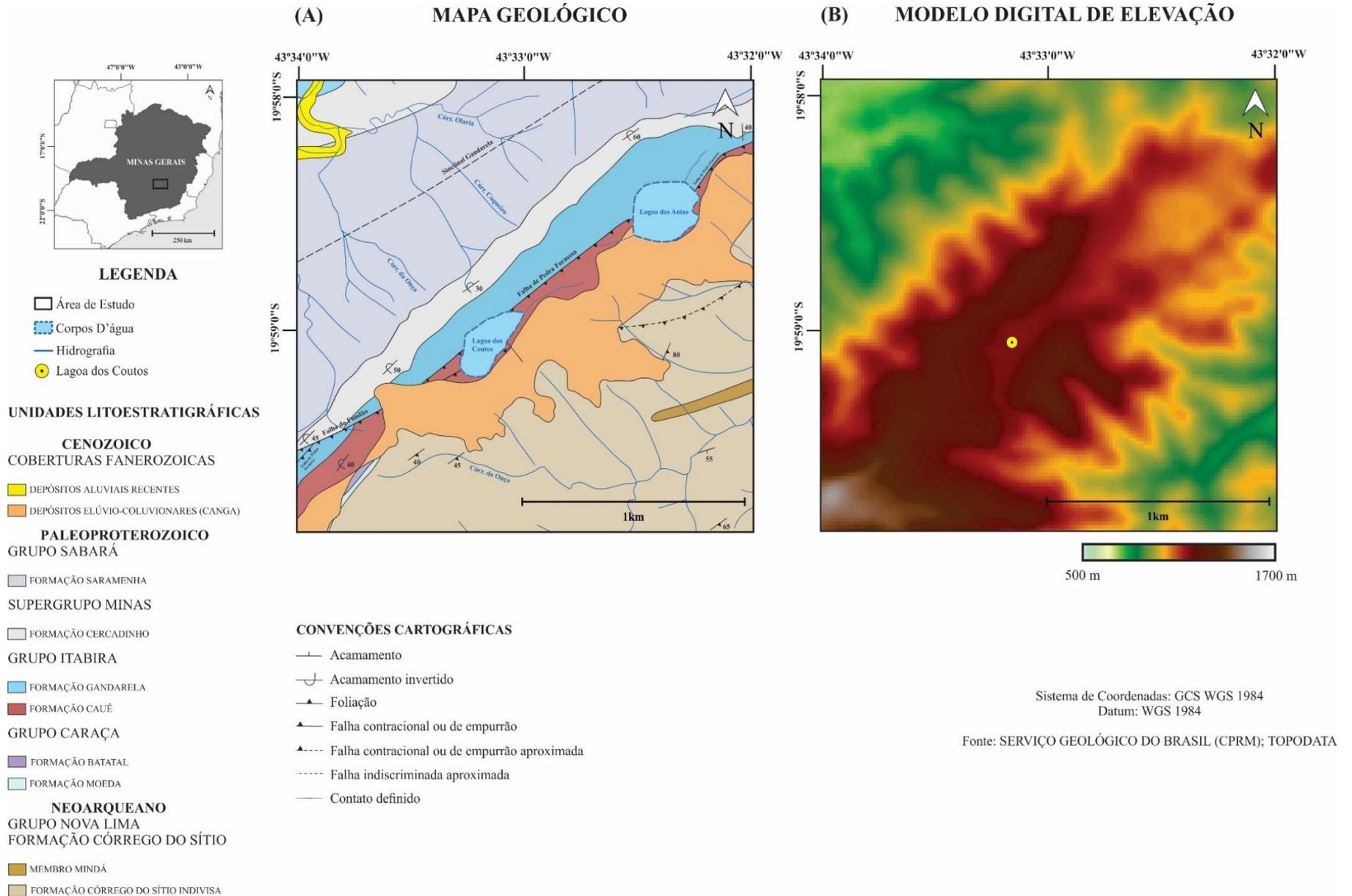
Figura 15 – Mapa geológico da Serra do Gandarela e seu entorno



Fonte: Modificado de Lamounier (2011) adaptado de Dorr (1969).

A Lagoa dos Coutos, situada no interior do Sinclinal Gandarela, está inserida em um contexto geológico dominado por depósitos continentais supracrustais e pelas rochas do Supergrupo Minas (Figura 16). As coberturas supracrustais são representadas por depósitos elúvio-coluvionares cenozoicos, resultantes do intemperismo das formações ferríferas bandadas (BIFs), que originaram as cangas. As rochas do Supergrupo Minas na área correspondem ao Grupo Itabira, destacando-se as Formações Cauê e Gandarela. A estratigrafia local encontra-se invertida, de modo que a Formação Cauê se sobrepõe estruturalmente à Formação Gandarela.

Figura 16 - (A) Mapa geológico da Lagoa dos Coutos e seu entorno, Serra do Gandarela – MG; (B) Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo



Fonte: Autor (2025).

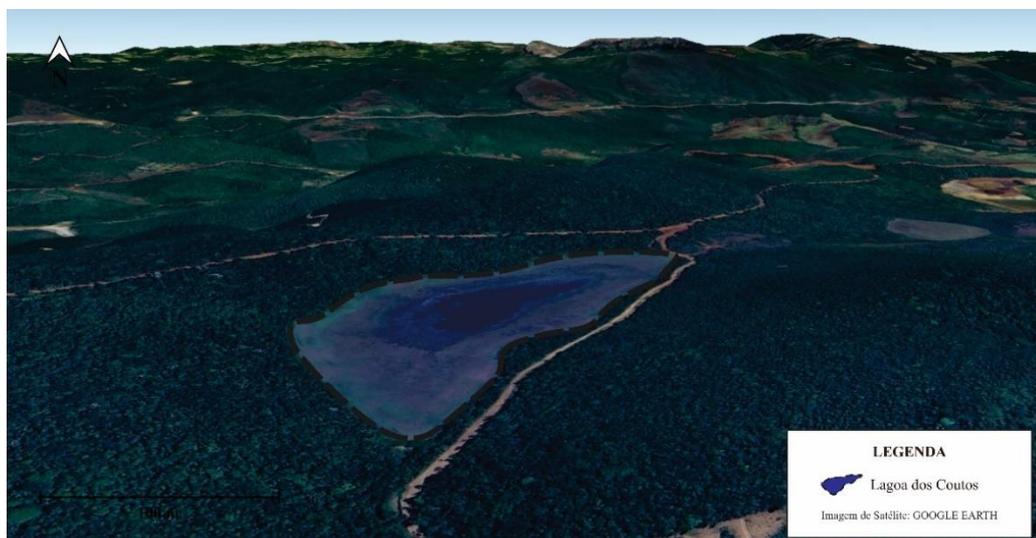
O Sinclinal Gandarela apresenta uma configuração sinformal composta por três segmentos: um segmento nordeste, com eixo N60°E; um segmento central, com direção N40°E; e um segmento sul, orientado aproximadamente na direção N-S (Chemale Jr. *et al.*, 1991). Essa estrutura influencia diretamente a morfologia da borda leste do Quadrilátero Ferrífero, onde se insere a Serra do Gandarela.

O relevo regional é condicionado por fatores litoestruturais e geotectônicos, caracterizando-se por sinclinais suspensos, anticlinais erodidos e cristas bem definidas (Silva & Salgado, 2009). As cristas mais elevadas do Sinclinal Gandarela são formadas principalmente por cangas e itabiritos da Formação Cauê, enquanto as cristas intermediárias correspondem, em sua maioria, a quartzitos da Formação Cercadinho, pertencente ao Grupo Piracicaba (Silva & Salgado, 2009).

Nas bordas das elevações, sobretudo nas margens das escarpas associadas aos afloramentos quartzíticos, observam-se depressões topográficas que coincidem com as bacias dos rios das Velhas, Conceição, Socorro e Ribeirão do Prata. Nesses setores, a maior suscetibilidade à erosão de litotipos menos resistentes, como xistos e filitos dos Grupos Nova Lima e Piracicaba, favorece a dissecação do relevo (Silva & Salgado, 2009).

Por fim, a Lagoa dos Coutos encontra-se em uma zona de maior altitude, inserida na diversidade geomorfológica do Sinclinal Gandarela, onde predominam morros arredondados e vales profundamente entalhados, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Imagem do Google Earth Pro evidenciando o relevo no entorno da Lagoa dos Coutos

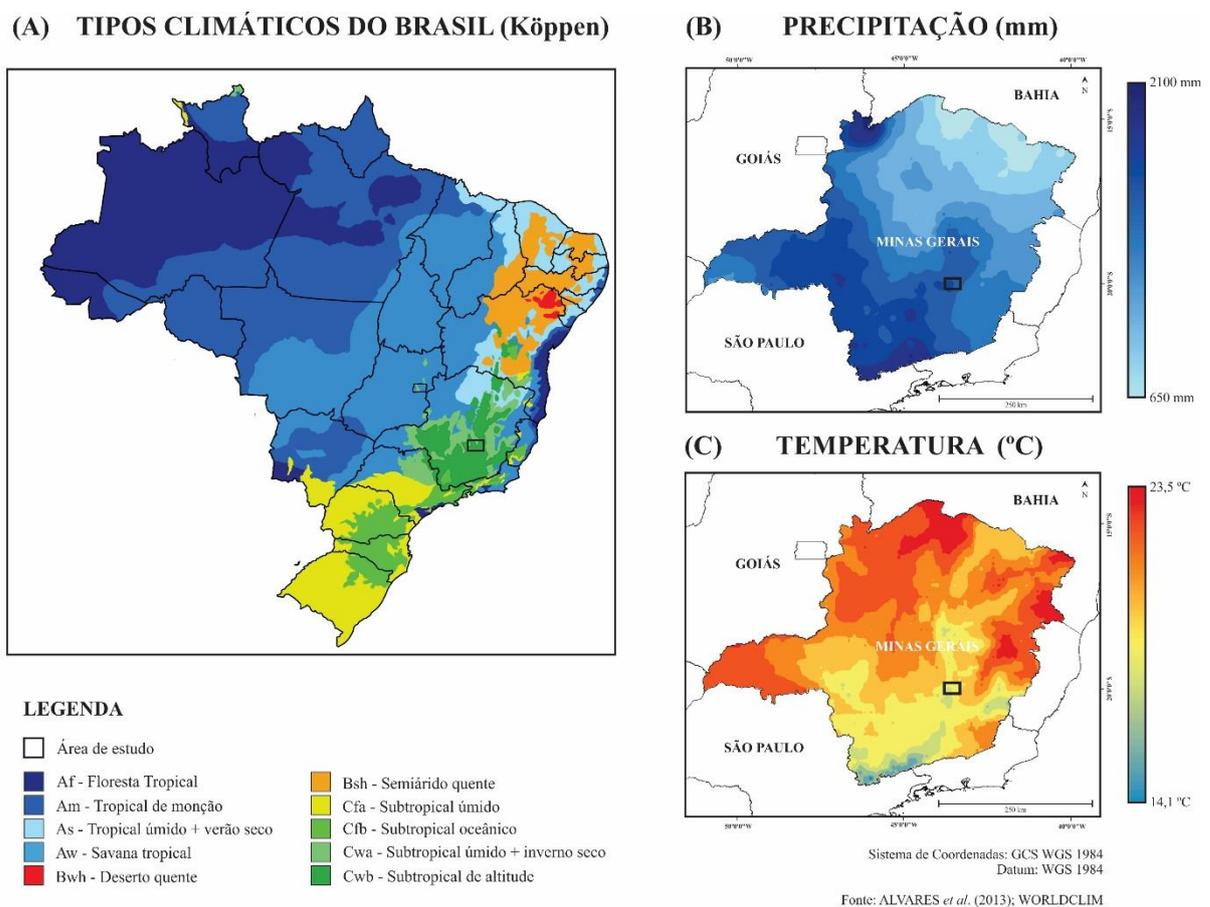


Fonte: Autor (2025)

### 3.3 Clima

O clima no Quadrilátero Ferrífero é classificado, de forma geral, como tropical semiúmido (IBGE, 2002). De acordo com a classificação climática de Köppen, atualizada por Alvares *et al.* (2013), a região apresenta duas zonas climáticas distintas: nas áreas de maior altitude, predomina o clima Cwb — subtropical de altitude —, enquanto as áreas de menor altitude são caracterizadas pelo clima Cwa — subtropical úmido com inverno seco. A Lagoa dos Coutos está inserida em uma área sob influência do clima Cwb (Figura 18).

Figura 18 - (A) Mapa dos tipos climáticos do Brasil conforme a classificação de Köppen; (B) e (C) Mapas de precipitação média e de temperatura média atmosférica para o estado de Minas Gerais



Fonte: Autor (2025).

Dados do WorldClim (<https://worldclim.org/>; 2024), representados em mapas de temperatura média anual (°C) e precipitação média anual (mm) (Figura 18), evidenciam as condições climáticas predominantes no estado de Minas Gerais. As

temperaturas médias anuais variam entre 15,7°C e 27,7°C, enquanto a precipitação média oscila entre 650 mm e 2100 mm. Fernandes (2023) apresenta um panorama climático mais específico da Serra do Gandarela, indicando variações de temperatura entre 14°C e 27°C, umidade relativa do ar entre 60% e 70%, e precipitação média anual em torno de 1.400 mm.

A circulação atmosférica responsável pela configuração climática da região central de Minas Gerais, onde se localiza a Serra do Gandarela, ocorre predominantemente na direção leste-nordeste (E-NE), embora também sofra influência de massas de ar provenientes do oeste (W) e do sul (S). O regime climático é caracterizado por uma estação seca no inverno austral e uma estação chuvosa no verão (Nimer, 1972; Abreu, 1998). Esse padrão sazonal está diretamente associado à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Jardim & Moura, 2018).

O gradiente altimétrico da Serra do Gandarela exerce influência significativa na dinâmica climática regional, funcionando como uma barreira orográfica capaz de interceptar e reter parte da umidade transportada pela vertente de barlavento (leste), em razão do choque entre massas de ar (Nimer, 1972; Fernandes & Moreira, 2022). Ao ultrapassarem os cumes, essas massas de ar perdem umidade — fenômeno conhecido como sombra de chuva —, resultando em aumento das temperaturas e redução da umidade na vertente de sotavento (Jardim & Galvani, 2022).

### **3.4 Cobertura vegetal**

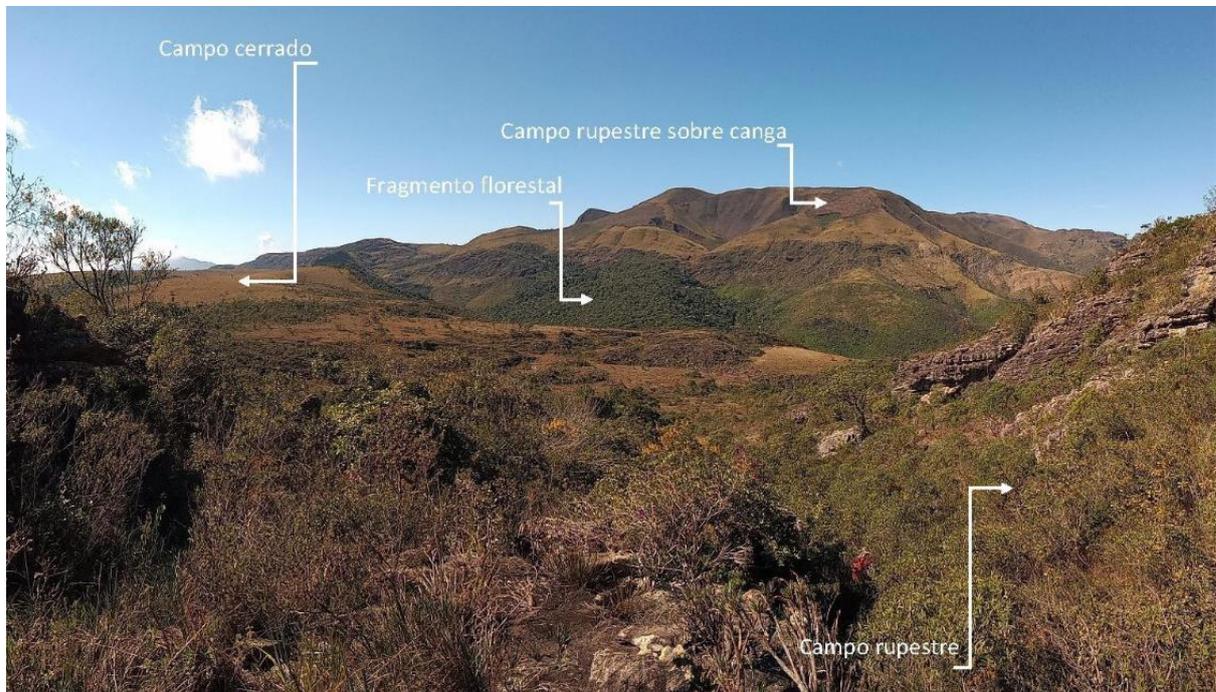
A região da Serra do Gandarela configura-se como um ecótono entre dois domínios morfoclimáticos e ecológicos do Brasil, segundo a classificação de Ab'Saber (2003): os Mares de Morros Florestados, caracterizados predominantemente pela presença de florestas tropicais; e os Chapadões Tropicais Interiores, recobertos por formações de Cerrado e penetrados por florestas-galeria.

O bioma Mata Atlântica abrange uma ampla diversidade de formações florestais — incluindo florestas ombrófilas densas, abertas e mistas, além de florestas decídua e semidecídua —, bem como ecossistemas associados, como manguezais, restingas, dunas, estuários, lagoas de altitudes, vegetações arbustivas. Trata-se de um dos biomas mais complexos e diversos do Brasil (Oliveira-Filho & Fontes, 2000).

O Cerrado, por sua vez, destaca-se pela grande variedade de fitofisionomias, que variam desde campos abertos até formações florestais densas (Aguiar & Camargo, 2004). Ab'Saber (2006) ressalta que a zona de transição entre a Mata Atlântica e Cerrado é marcada pela interconexão de fragmentos vegetais de ambos os domínios, formando uma combinação fisiográfica em mosaico, típica de áreas de instabilidade ecológica.

A Serra do Gandarela reflete essa complexidade ecológica, apresentando uma notável diversidade de fitofisionomias. Segundo Lamounier (2011), predominam na região as formações de floresta estacional semidecidual, típicas da Mata Atlântica, além de formações savânicas características do Cerrado, como o cerradão, os campos limpos e os campos sujos. Destacam-se ainda os campos rupestres, um mosaico de vegetação montana, predominantemente herbáceo-arbustiva, associada a afloramentos rochosos (Silveira *et al.*, 2016). A paisagem local também é marcada por plantações de eucalipto e por atividades agrossilvipastoris (Figura 19).

Figura 19 - Fitofisionomias do Parque Nacional da Serra do Gandarela



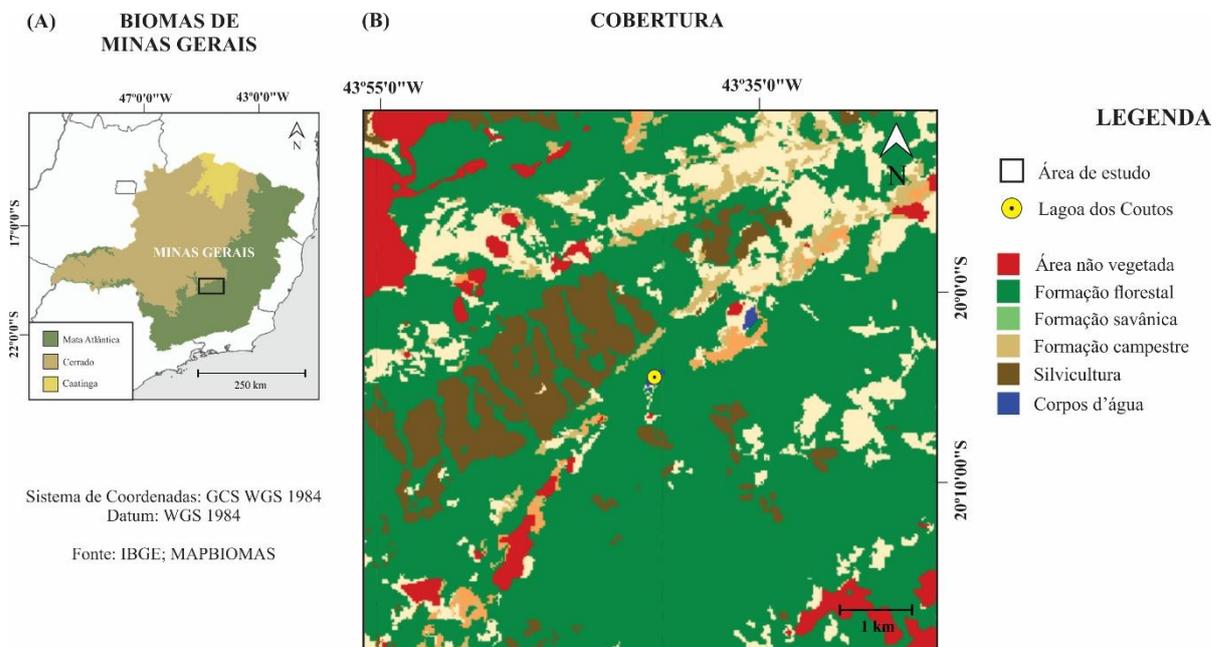
Fonte: Retirado de Fernandes (2023).

A geologia do Quadrilátero Ferrífero exerce papel determinante na distribuição das formações vegetais na Serra do Gandarela. Estudos de Lamounier (2011)

demonstram que a litologia condiciona diretamente a configuração das fitofisionomias. Os campos rupestres, por exemplo, desenvolvem-se sobre cangas e quartzitos, predominando nas áreas de maior altitude, onde afloram rochas mais resistentes ao intemperismo, pertencentes ao Grupo Itabira (Formação Cauê), Grupo Caraça e Grupo Maquiné. Por outro lado, os campos abertos, com vegetação mais esparsa, distribuem-se preferencialmente sobre as rochas do Grupo Nova Lima, localizadas na porção oeste da serra. Já as florestas estacionais semidecíduais ocorrem, majoritariamente, sobre as formações carbonáticas da Formação Gandarela (também vinculada ao Grupo Itabira) e sobre os filitos do Grupo Piracicaba.

A Lagoa dos Coutos insere-se em uma área predominantemente ocupada por floresta estacional semidecidual, conforme indicado no mapa de cobertura vegetal apresentado na Figura 20. Contudo, segundo Leibowitz (2016), a lagoa é também parcialmente circundada por afloramentos de canga, que abrigam uma vegetação singular e altamente endêmica, os campos rupestres.

Figura 20 - (A) Mapa de Biomas de Minas Gerais - BR; (B) Mapa da cobertura vegetal da área de estudo, Serra do Gandarela e seu entorno



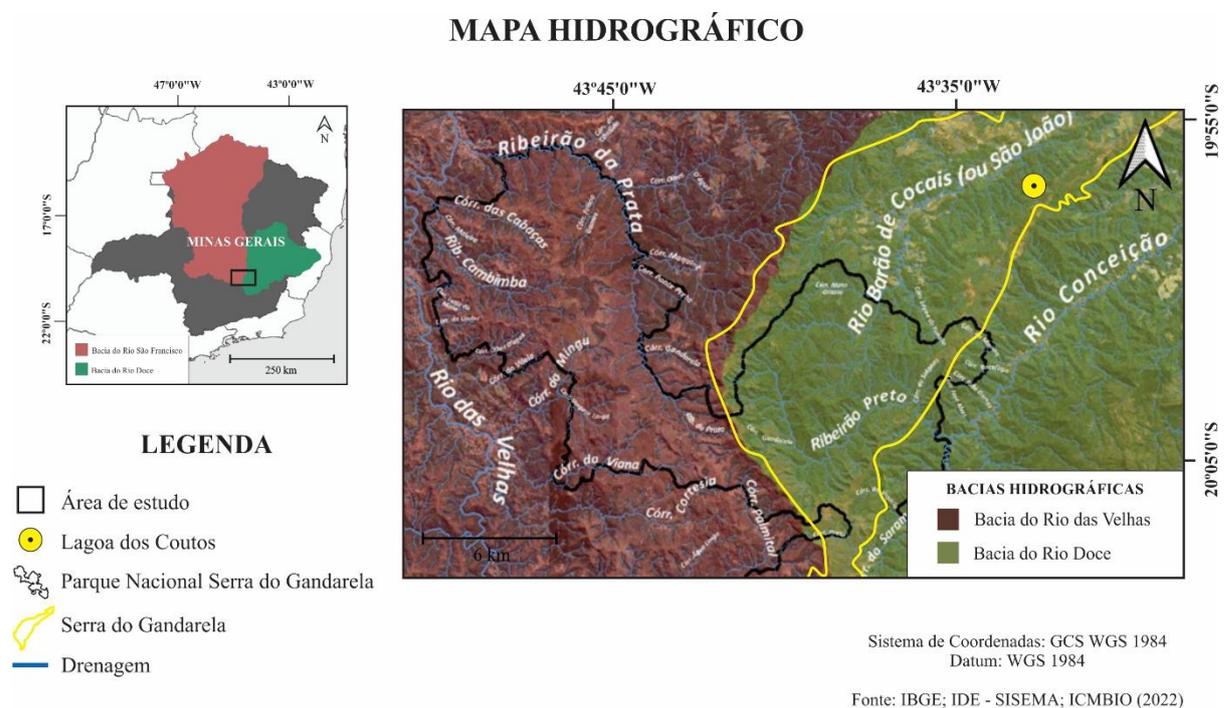
Fonte: Autor (2025).

### 3.5 Hidrografia

A Serra do Gandarela está localizada no divisor de duas importantes bacias hidrográficas do Brasil: a bacia do rio São Francisco, representada pelo rio das Velhas, e a bacia do rio Doce, representada pelos rios Conceição e Barão de Cocais (Figura 21). A região é reconhecida por sua elevada capacidade de geração e recarga hídrica, abrigando milhares de nascentes, córregos e rios que contribuem diretamente para o regime hídrico de ambas bacias.

No contexto da bacia do Rio Doce, destaca-se a Lagoa dos Coutos, que apresenta características hidrológicas peculiares. Conforme descrito por Leibowitz (2016), embora esteja inserida nessa bacia, ela não é alimentada por cursos d'água perenes. Seu balanço hídrico é sustentado exclusivamente pela precipitação direta, o que resulta em variações expressivas no nível da lâmina d'água ao longo do ciclo anual.

Figura 21 - Mapa hidrográfico da área de estudo, Serra do Gandarela e seu entorno



Fonte: Modificado de ICMBio (2022).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Estudos de referência

A revisão bibliográfica reuniu informações provenientes de pesquisas científicas realizadas em regiões próximas à área de estudo, que apresentam similaridades ecológicas com a Serra do Gandarela, em Minas Gerais. Além disso, foram considerados estudos com registros cronológicos correlatos, possibilitando a comparação das mudanças paleoambientais ao longo do Quaternário.

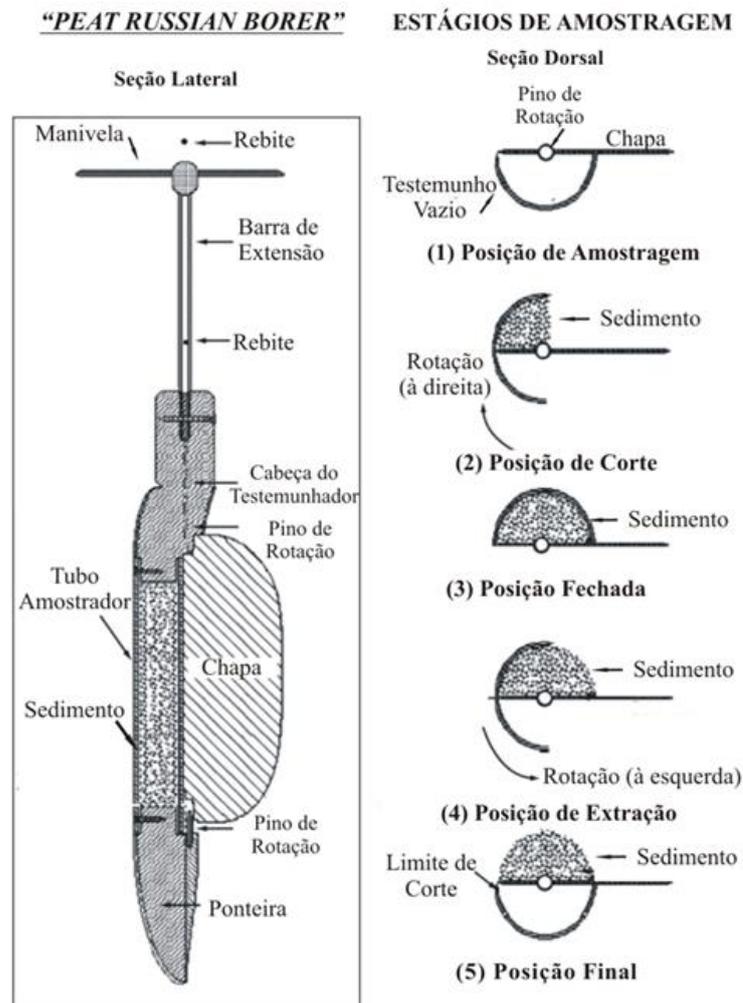
Entre as principais referências, destacam-se os trabalhos de Behling (1995), Raczka *et al.* (2013) e Hórak *et al.* (2015), os quais forneceram *insights* relevantes sobre a variabilidade climática e vegetacional em contextos ambientais semelhantes. Embora a literatura específica sobre a Lagoa dos Coutos ainda seja limitada, os estudos de Leibowitz (2016), Dias (2014) e Viana (2017) contribuíram para a caracterização ambiental da área, subsidiando a contextualização do presente trabalho.

### 4.2 Coleta do testemunho sedimentar

A coleta foi realizada na margem da Lagoa dos Coutos, conforme indicado pelo marcador no mapa da Figura 12, utilizando-se o amostrador manual *Peat Russian Borer* (Figura 22), desenvolvido para a extração de sedimentos inconsolidados em ambientes de águas rasas, com profundidade máxima de 2 metros (Souza *et al.*, 2008).

Foram coletados três segmentos de 0,50 metro cada, totalizando 1,24 metro de testemunho sedimentar, após considerar as perdas ocorridas durante o processo de amostragem. O procedimento adotado compreendeu cinco etapas sequenciais: (1) inserção vertical do equipamento no sedimento; (2) rotação de 180° no eixo, com o auxílio de manivela; (3) estabilização do sedimento no interior da sonda; (4) remoção do equipamento; e (5) rotação anti-horária para a abertura e exposição do sedimento. Cada seção foi acondicionada em tubos de PVC, visando à preservação das características sedimentológicas para análises posteriores (Figura 23).

Figura 22 - Estrutura do testemunhador e etapas operacionais de amostragem sedimentológica



Fonte: Retirado de Souza *et al.* (2008).

Figura 23 - Fotografias do testemunho sedimentar: (A) Sedimento recém-extraído com o *Peat Russian Borer*; (B): Sedimento acondicionado em um tubo de PVC para o transporte



Fonte: Autor (2025).

### 4.3 Descrição do testemunho sedimentar

A descrição detalhada foi realizada no Laboratório de Paleontologia e Micropaleontologia do Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), empregando critérios mineralógicos, granulométricos e texturais, com o auxílio de lupa de 30× e régua milimétrica.

Foram avaliados os seguintes parâmetros: espessura das camadas, coloração dos sedimentos, granulometria e composição dos grãos, teor de matéria orgânica (classificado como alto, médio e baixo), presença de detritos vegetais e tipo de contato entre as camadas. A classificação granulométrica seguiu a Escala de Wentworth (1922) (Quadro 2), e tubos de PVC graduados a cada centímetro foram utilizados como referência para a aferição da espessura das camadas.

Quadro 2 – Classificação granulométrica segundo Escala de Wentworth (1922)

$\phi$	Português	Inglês	mm
-9	Bloco	Boulder	512
-8			256
-7	Seixo	Cobble	128
-6			64
-5			32
-4	Cascalho muito grosseiro	Very coarse gravel	16
-3	Cascalho grosseiro	Coarse gravel	8
-2	Cascalho médio	Medium gravel	4
-1	Cascalho fino	Fine gravel	2
0	Areia muito grosseira	Very coarse sand	1,000
1	Areia grosseira	Coarse sand	0,500
2	Areia média	Medium sand	0,250
3	Areia fina	Fine sand	0,125
4	Areia muito fina	Very fine sand	0,0625
5	Silte grosseiro	Coarse silt	31,25
6	Silte médio	Medium silt	15,63
7	Silte fino	Fine silt	7,81
8	Silte muito fino	Very fine silt	3,91
9	Argila grosseira	Coarse clay	1,95
10	Argila média	Medium clay	0,98
11	Argila fina	Fine clay	0,49
12	Argila muito fina	Very fine clay	0,24
13	Colóides	Colloid	0,12

Fonte: Adaptado de Wentworth (1922).

#### 4.4 Datação das amostras

Amostras do testemunho analisado foram enviadas para datação por radiocarbono, cujos resultados, no entanto, não foram obtidos a tempo da finalização deste trabalho. Para estimar a cronologia do perfil, foram consideradas idades obtidas em testemunhos anteriores da mesma lagoa, analisados por Luciana Vetel Cruz (dados não publicados) e por Leibowitz (2016). Os resultados indicaram as seguintes idades:

1. 0-5 cm:  $2.250 \pm 30$  anos (2.250 anos cal AP);
2. 5-10 cm:  $6.710 \pm 30$  anos (7.550 anos cal AP);
3. 28 cm:  $18.315 \pm 381$  anos AP (comunicação pessoal de Hermínio Arias Nalini Júnior).

Com base nesses dados, foi aplicado um modelo cronológico utilizando o pacote Bacon no software R (Blaauw & Christen, 2011), que emprega estatísticas bayesianas para estimar taxas de sedimentação. O modelo indicou uma idade máxima de aproximadamente 70.476 anos cal AP para o testemunho sedimentar analisado.

#### 4.5 Preparação e análise de amostras

Foram extraídas 124 amostras (~20 g cada) dos segmentos do testemunho sedimentar, utilizando-se uma espátula esterilizada com álcool 70% a cada coleta. Para a análise das macropartículas de carvão vegetal, foram retiradas porções de 1 cm<sup>3</sup> de cada amostra, totalizando 124 unidades, armazenadas em recipientes plásticos apropriados.

Para a análise polínica, foram selecionadas quatro amostras representativas de diferentes períodos, considerando as limitações de resolução temporal impostas pela quantidade reduzida de material disponível. Cada amostra, com aproximadamente 1 cm<sup>3</sup>, foi armazenada em tubos de ensaio sob refrigeração até o processamento químico.

A cada amostra, adicionou-se uma pastilha (1 mg) do marcador exótico *Lycopodium clavatum* (lote 17.7745, contendo 9.666 grãos por pastilha), conforme Stockmar (1971), para o cálculo das concentrações (grãos/cm<sup>3</sup>) de palinóforos.

#### 4.5.1 Macropartículas de carvão vegetal

O processamento das amostras seguiu o protocolo de Hawthorne *et al.* (2018), que inclui etapas de tratamento químico com hipoclorito de sódio (NaClO) e hidróxido de potássio (KOH) para desagregação dos sedimentos, remoção de ácidos húmicos e descoloração de detritos orgânicos. Após peneiramento em malha de 100 µm, os fragmentos foram identificados microscopicamente com base em suas características ópticas (cor preta, opacidade, alta refletividade, fragilidade à quebra e presença de rastro de pó), conforme os parâmetros estabelecidos por Jones *et al.* (1970) e Clark & Royall (1996).

As imagens digitais dos fragmentos foram capturadas por meio do software ImageJ (Abràmoff *et al.*, 2004), o qual também foi empregado para a quantificação, contagem e mensuração das partículas.

#### 4.5.2 Grãos de pólen, esporos e algas

As amostras foram tratadas quimicamente segundo o protocolo de Salgado-Labouriau (2007), que compreende: (1) eliminação dos ácidos húmicos com hidróxido de potássio (KOH); (2) dissolução dos carbonatos utilizando ácido clorídrico (HCl); e (3) remoção dos silicatos com ácido fluorídrico (HF). Os resíduos resultantes foram montados em lâminas com gelatina glicerinada, numeradas como LC 104–103, LC 71–70, LC 23–22 e LC 02–01.

As análises seguiram duas etapas principais:

1. Qualitativa: identificação morfológica dos palinomorfos, conforme os critérios descritos no item 2.2.1.1 (Morfologia polínica);
2. Quantitativa: contagem mínima de 300 palinomorfos por lâmina, incluindo os esporos de *Lycopodium clavatum*.

As lâminas foram analisadas em microscópio óptico Novel BM-2100, com ampliações de 400×, 600× e 1000×. Os registros fotográficos foram obtidos utilizando o software TCCapture.

O reconhecimento dos palinomorfos contou com o suporte do software Pollen Key (Bush & Weng, 2006), e de literatura especializada, como o Atlas Palinológico (Lorente

*et al.*, 2017) e artigos científicos. A identificação dos grãos de pólen foi realizada até o menor nível taxonômico possível (espécie, gênero ou família). Nos casos em que a identificação precisa não foi viável, os palinomorfos foram classificados como "*não identificados*".

Em determinadas situações, adotou-se a designação "Tipo" seguida do nome taxonômico, indicando que os grãos de pólen apresentam características morfológicas semelhantes às de determinado táxon, mas que também podem ser compartilhadas por outros grupos dentro da mesma família ou de famílias distintas. Por exemplo, o "Tipo *Ziziphus*" inclui grãos morfológicamente semelhantes aos do gênero *Ziziphus*, mas que também podem ser produzidos por outros gêneros da família Rhamnaceae, como *Reisseckia*.

Os táxons identificados foram organizados no Quadro 3 com base em suas características ecológicas e nos ambientes em que ocorrem, classificados nas seguintes categorias: "lianas/trepadeiras", "ervas", "subarbustos/arbustos", "árvores", "esporos de pteridófitas/monilófitas/briófitas" e "esporos de algas".

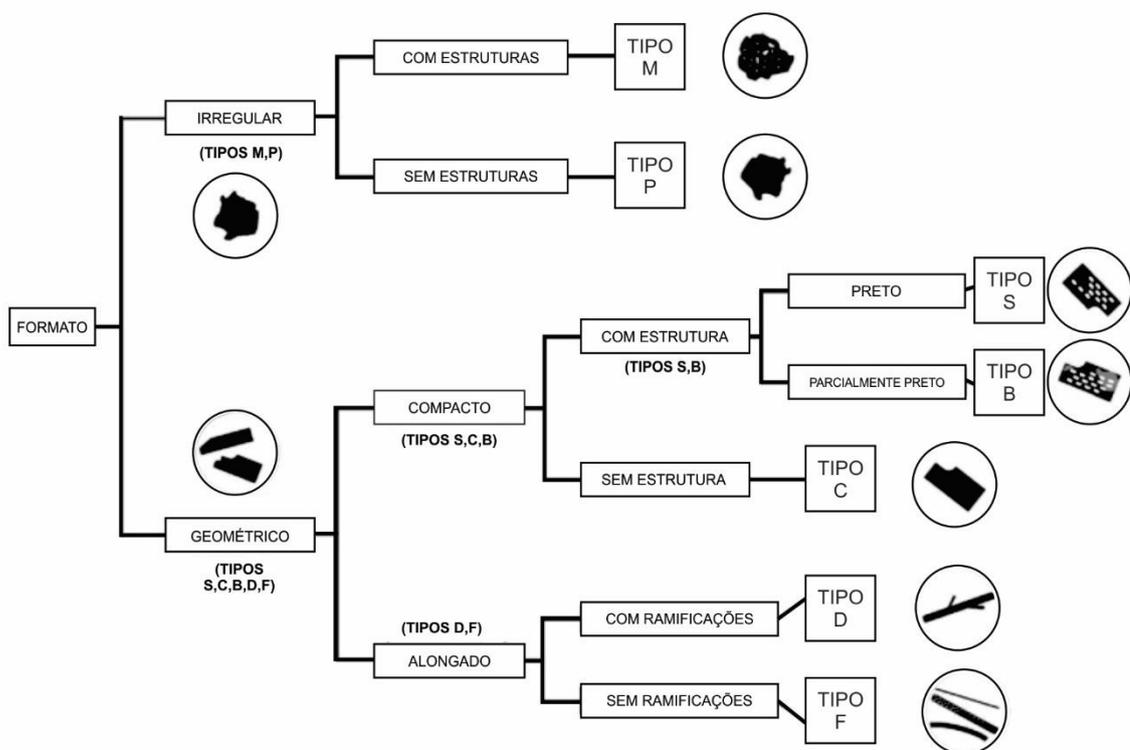
Com o objetivo de preservar as informações obtidas e assegurar a conservação do material palinológico, todas as lâminas confeccionadas foram devidamente catalogadas e incorporadas à palinoteca do Laboratório de Paleontologia e Micropaleontologia, vinculado ao Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), onde permanecem armazenadas para consulta e utilização em pesquisas futuras.

#### **4.6 Tratamento de dados e interpretação**

Os fragmentos de carvão vegetal foram classificados em morfotipos, com base nos critérios visuais propostos por Enache & Cumming (2006), Mustaphi & Pisaric (2014) e Vachuela *et al.* (2021). Para a visualização dos resultados, foram elaborados diagramas no software C2 (Juggins, 2007). Os dados foram expressos nas seguintes métricas: influxo de carvão (número de partículas/cm<sup>2</sup>/ano); área total de carvão (mm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/ano); área de carvão individual de cada fragmento (mm<sup>2</sup>); e razão comprimento/largura (C/L).

Enache & Cumming (2006) realizaram análises das características morfológicas de fragmentos de carvão vegetal preservados no Lago Prosser, na Colúmbia Britânica, Canadá, com o objetivo de elaborar uma chave morfológica para a identificação desses vestígios (Figura 24). Os autores reconheceram sete tipos distintos de fragmentos, classificados com base na forma, na razão entre os eixos maior e menor e na presença ou ausência de porosidade.

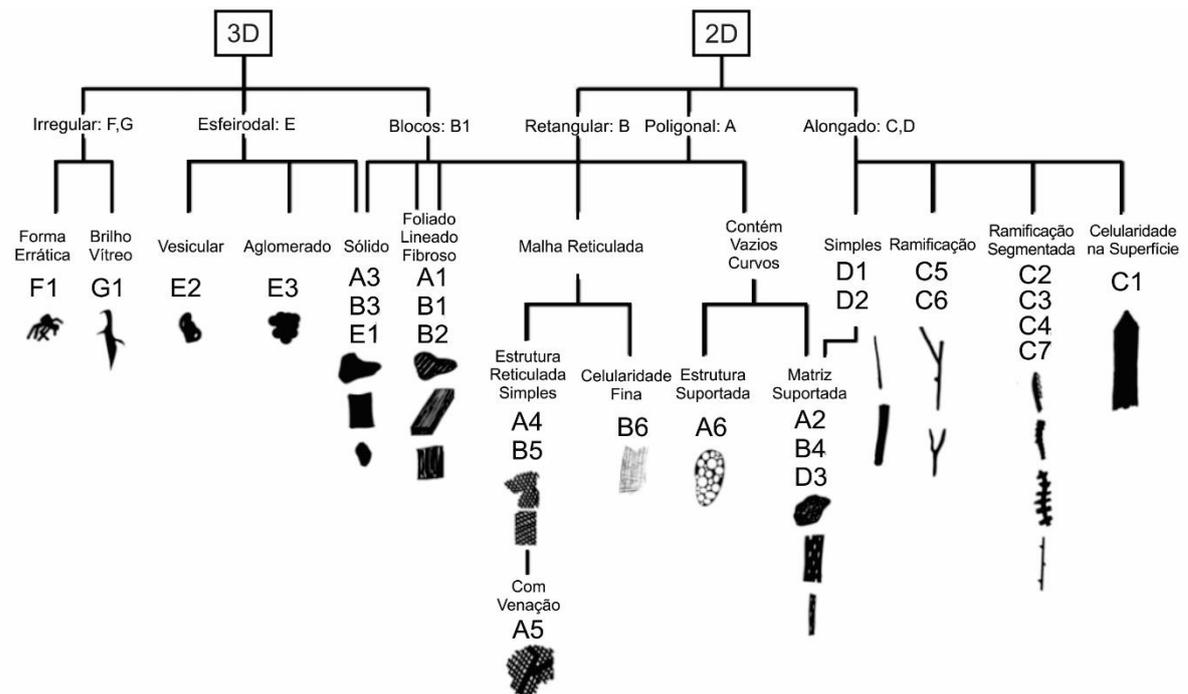
Figura 24 - Diagrama com esquema simplificado para identificação de morfotipos de carvão vegetal



Fonte: Modificado de Enache & Cumming (2006).

Posteriormente, Mustaphi & Pisaric (2014) expandiram essa chave ao analisar as características macroscópicas de fragmentos de carvão vegetal provenientes de núcleos sedimentares lacustres do sudeste da Colúmbia Britânica, Canadá. O objetivo do estudo foi caracterizar diferentes morfotipos de carvão com base na morfologia geral dos fragmentos, na textura superficial e em atributos específicos, como o grau de brilho. Como resultado, os autores desenvolveram uma chave de identificação voltada à análise macroscópica do carvão vegetal, na qual os fragmentos foram agrupados em sete categorias principais, subdivididas em um total de 25 subclasses morfológicas (Figura 25).

Figura 25 - Chave de classificação para análise macroscópica da morfologia do carvão sedimentar



Fonte: Modificado de Mustaphi & Pisaric (2014).

A interpretação dos dados polínicos fundamentou-se nas frequências absolutas e relativas dos grãos de pólen, esporos e algas identificados nas amostras LC 104–103, LC 71–70, LC 23–22 e LC 02–01. A visualização dos resultados foi realizada por meio de diagramas polínicos de porcentagem e de concentração, elaborados com o software C2 (Juggins, 2007).

A porcentagem de cada tipo polínico foi calculada a partir da relação entre o número de grãos de pólen identificados e o total de pólen presente em cada amostra analisada. A concentração dos tipos polínicos, por sua vez, foi determinada com base na quantidade do marcador exótico *Lycopodium clavatum* (9.666 grãos por cm<sup>3</sup> de sedimento), sendo expressa em grãos por centímetro cúbico (grãos/cm<sup>3</sup>) de sedimento para cada táxon, independentemente dos demais, conforme a metodologia descrita por Salgado-Labouriau & Rull (1986).

Para a construção dos diagramas polínicos, os grãos de pólen foram agrupados em dois conjuntos: elementos não arbóreos, que incluem lianas/trepadeiras, ervas, subarbustos, arbustos e plantas aquáticas e elementos arbóreos, compostos pelas árvores. Esses agrupamentos foram definidos a partir da análise das informações ecológicas disponíveis para cada táxon. Os esporos foram classificados em três

categorias: esporos de pteridófitas, esporos de monilófitas e esporos de briófitas. As algas, por sua vez, foram agrupadas como esporos de algas.

Adicionalmente, foram elaboradas representações esquemáticas da paisagem (Figuras 33 e 34), considerando as preferências ecológicas de cada táxon. Essas representações, baseadas nas frequências relativas (percentuais) dos conjuntos polínicos, foram produzidas utilizando o software CoreIDRAW.

#### **4.7 Comparação com dados paleoclimáticos**

Para investigar os fatores climáticos que influenciaram o meio ecológico da Lagoa dos Coutos durante o Quaternário, foram utilizados *proxies* paleoclimáticos disponíveis em bases de dados especializadas, como o NOAA Paleoclimatology Database (<https://www.ncei.noaa.gov/>). Entre os principais registros selecionados, destacam-se as séries de  $\delta^{18}\text{O}$  extraídas de espeleotemas das cavernas de Botuverá (Cruz *et al.*, 2005), e das cavernas Lapa Grande e Lapa Sem Fim (Stríkis *et al.*, 2011; Stríkis *et al.*, 2015). Esses registros isotópicos fornecem informações sobre mudanças na precipitação e na intensidade da convecção associada às zonas de convergência atmosférica ao longo do tempo.

Adicionalmente, foram considerados dados sobre a concentração atmosférica de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), obtidos a partir de testemunhos de gelo da Antártida (Lüthi *et al.*, 2008). Esses núcleos de gelo preservam amostras de ar aprisionadas que registram, de forma precisa, as variações nas concentrações de  $\text{CO}_2$  ao longo do Quaternário. As flutuações nesses níveis estão intimamente relacionadas às oscilações da temperatura global, como demonstrado por Parrenin *et al.* (2013).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Caracterização sedimentológica

A amostragem sedimentar recuperou integralmente os 124 cm perfurados, revelando uma sequência composta predominantemente por intercalações de sedimentos argilo-siltosos a silto-arenoso (Figura 26). A coloração escura observada deve-se à presença de matéria orgânica e de detritos vegetais, como caules e raízes.

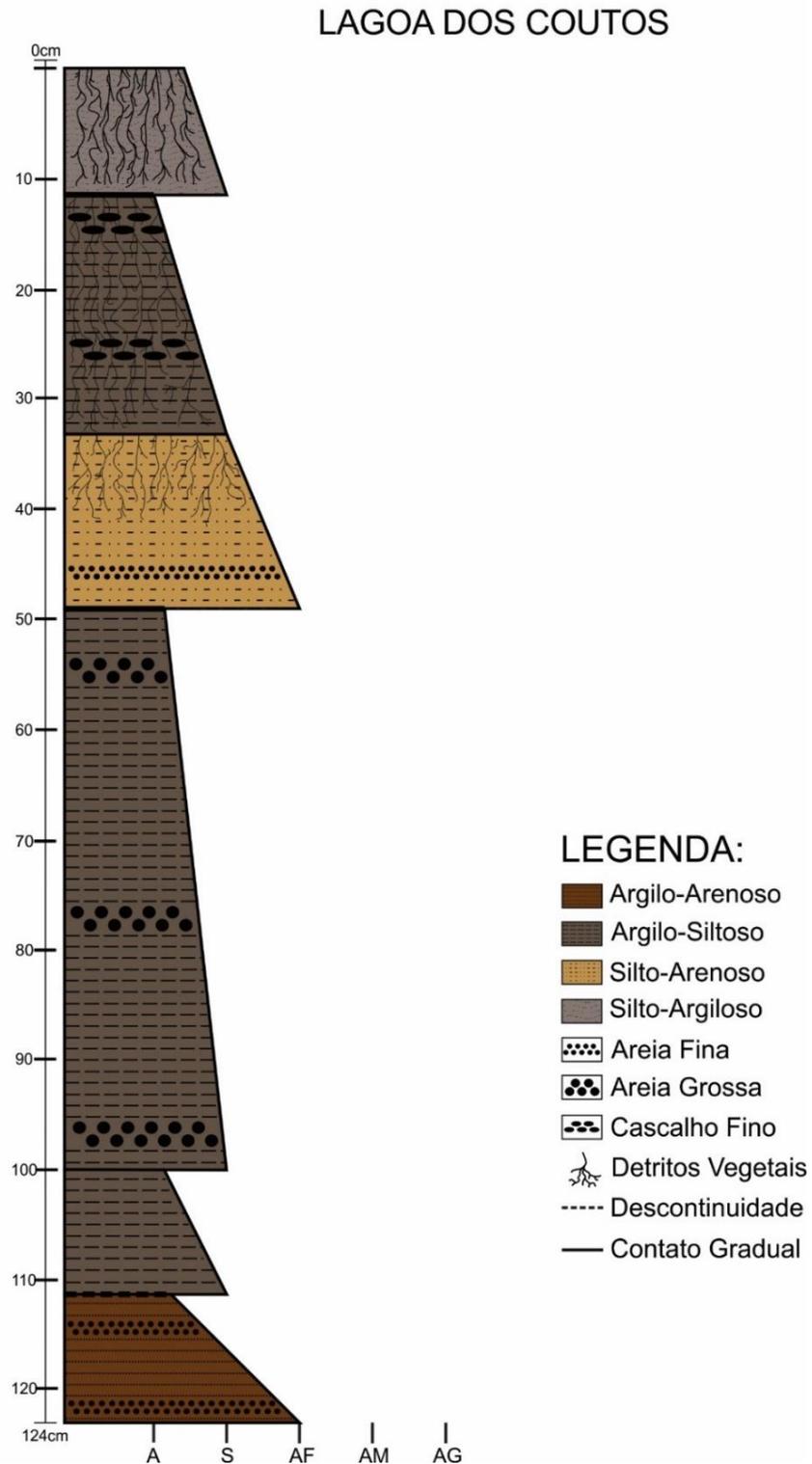
A sequência sedimentar da Lagoa dos Coutos foi dividida em seis intervalos, com base nas variações dos seguintes parâmetros: cor do sedimento, granulometria, textura, presença de matéria orgânica e ocorrência de detritos vegetais.

A seguir, apresentam-se as descrições detalhadas de cada intervalo:

1. Intervalo 1 (0 cm – 12 cm): Sedimentos de coloração acinzentada, com fração silto-argilosa e presença de lentes de areia. Observa-se concentração média de matéria orgânica, além de raízes vegetais, principalmente na porção superior. A base do intervalo apresenta uma descontinuidade em relação ao estrato subsequente;
2. Intervalo 2 (12 cm – 34 cm): Sedimentos de coloração preta, com granulometria argilo-siltosa e presença de grãos de cascalho fino (3-4 mm). Verifica-se alta concentração de matéria orgânica, com acúmulo mais expressivo de restos vegetais na base do estrato;
3. Intervalo 3 (34 cm – 49 cm): Sedimentos de coloração marrom acinzentada, com textura silto-arenosa e fração de areia fina (quartzo). Apresenta alta concentração de matéria orgânica e baixa concentração de restos vegetais. Nota-se uma descontinuidade no contato com o intervalo superior;
4. Intervalo 4 (49 cm – 100 cm): Sedimentos de coloração marrom escura, com textura argilo-siltosa e lentes de areia grossa, predominantemente de quartzo. Possui concentração de matéria orgânica média a alta, e baixa quantidade de restos vegetais. Neste intervalo, observa-se variação lateral para material mais arenoso;
5. Intervalo 5 (100 cm – 112 cm): Sedimentos de coloração preta, com textura argilo-siltosa. Apresenta elevada concentração de matéria orgânica, com ausência de restos vegetais. O material é homogêneo ao longo de toda a sua extensão;

6. Intervalo 6 (112 cm – 124 cm): Sedimentos de coloração marrom escura, com textura argilo-arenosa e predominância de areia fina, composta por grãos de quartzo.

Figura 26 - Perfil estratigráfico do testemunho sedimentar da Lagoa dos Coutos



## **5.2 Cronologia do testemunho**

As idades obtidas por datação radiocarbônica, tanto convencionais quanto calibradas, indicam que a deposição dos sedimentos no núcleo da Lagoa dos Coutos ocorreu ao longo dos últimos 70.476 anos cal AP. A unidade sedimentar associada ao ambiente lacustre revela variações nas taxas de sedimentação ao longo do tempo. De modo geral, contudo, essas taxas mantiveram-se relativamente estáveis durante o Quaternário.

Com base nas idades fornecidas pelo modelo idade-profundidade, as taxas de sedimentação variaram entre 0,1 e 0,25 cm por 100 anos ao longo de todo o registro. A partir desses valores, estima-se que o tempo médio de deposição dos sedimentos seja de aproximadamente 350 anos por centímetro.

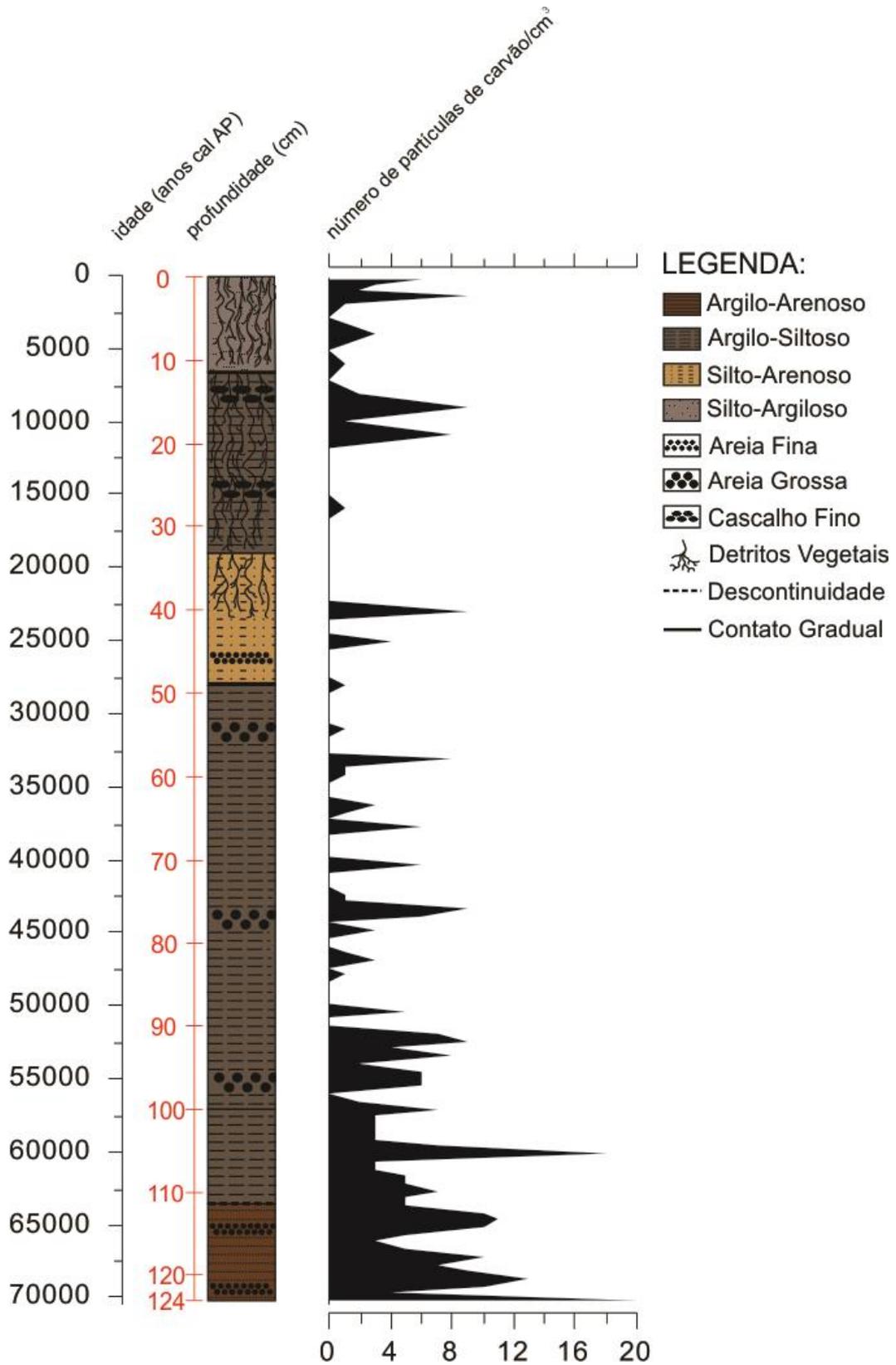
## **5.3 Análise palinológica**

### **5.3.1 Macropartículas de carvão vegetal**

Na sequência sedimentar da Lagoa dos Coutos, das 124 amostras analisadas, 69 apresentaram fragmentos de macropartículas de carvão vegetal, enquanto 55 não registraram a presença desses fragmentos.

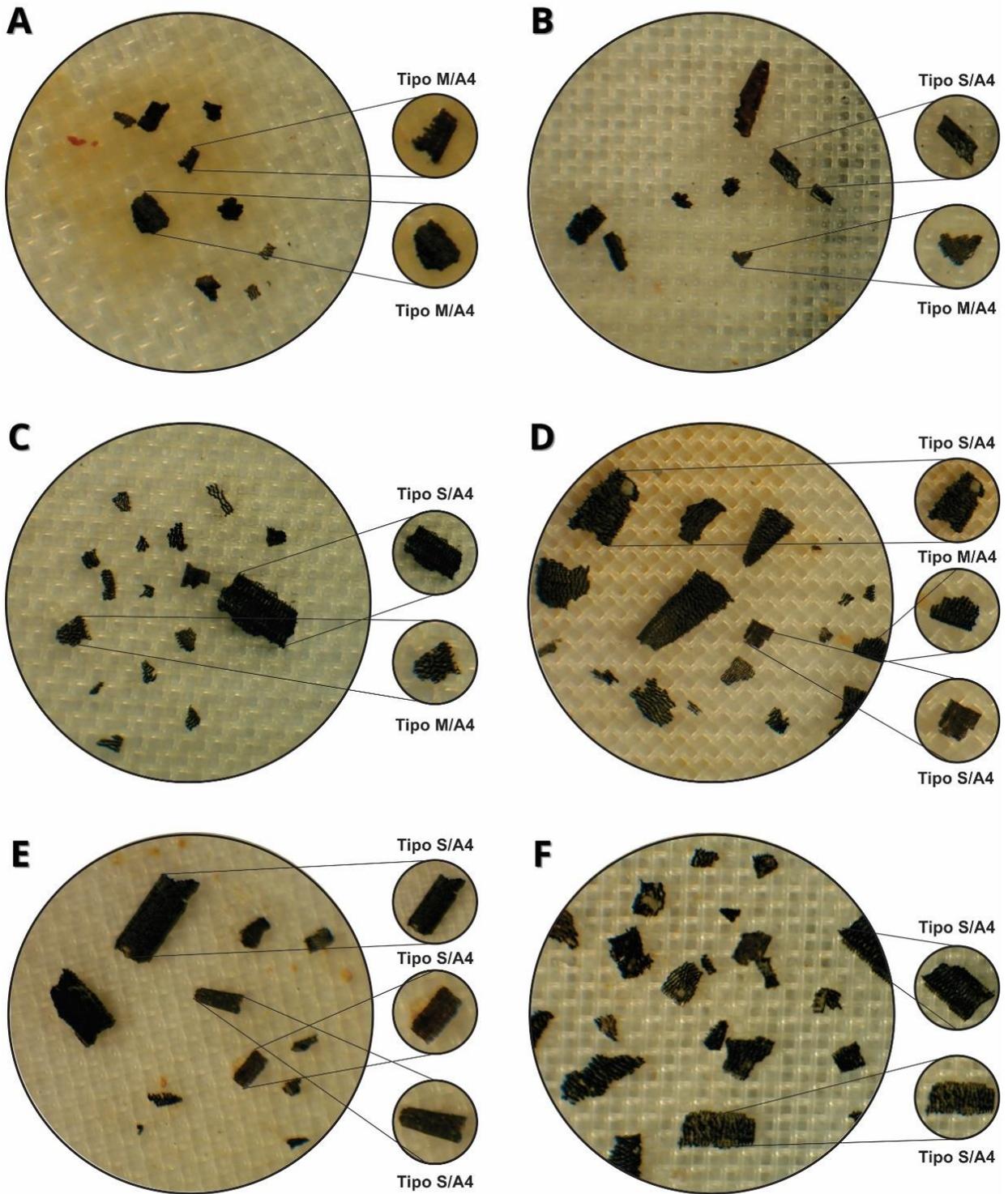
A Figura 27 ilustra a variação na concentração de partículas de carvão por centímetro cúbico (partículas/cm<sup>3</sup>) ao longo dos últimos 70.476 anos cal AP, conforme identificado no testemunho.

Figura 27 – Diagrama do número de macropartículas de carvão vegetal das amostras da sequência sedimentar da Lagoa dos Coutos, representado em função da idade calibrada (anos cal AP)



A análise morfológica dos fragmentos de carvão vegetal revelou baixa variabilidade entre os morfotipos identificados. Em geral, os fragmentos apresentaram morfologia poligonal, embora alguns exibissem geometria irregular, com superfícies estriadas, porosidade evidente e textura reticulada. Os fragmentos eram predominantemente finos e frágeis. Alguns possuíam contornos alongados e retos, com eixo principal claramente definido, enquanto outros eram mais arredondados, com eixos simétricos. Destaca-se também o brilho intenso e iridescente dos fragmentos, com aspecto oleoso à luz do microscópio. A Figura 28 apresenta exemplos representativos dessas partículas observadas durante a análise microscópica.

Figura 28 (próxima página) - Fotomicrografia dos morfotipos de carvão vegetal identificados nos sedimentos da Lagoa dos Coutos (Tipo: Classificação de Enache & Cumming (2006) / Classificação de Mustaphi & Pisaric (2014)). A: Amostra LC 13-12; B: Amostra LC 51-50; C: Amostra LC 97-96; D: Amostra LC 104-103; E: Amostra LC 118-117; F: Amostra LC 124-123



A determinação do tipo de combustível vegetal responsável pela formação dos fragmentos de carvão foi realizada com base nas classificações propostas por Enache & Cumming (2004) e Mustaphi & Pisaric (2014). Segundo a tipologia de Enache & Cumming (2004), os fragmentos encontrados foram enquadrados nos tipos M e S. O tipo M é caracterizado pelo formato irregular e estrutura celular visível, com alta porosidade nas paredes vegetais, sendo associado à combustão de galhos e folhas de plantas lenhosas sob altas temperaturas. Já o tipo S apresenta geometria poligonal e também elevada porosidade, sendo resultado da queima de madeira e cascas de árvores.

Com base na classificação morfológica de Courtney-Mustaphi & Pisaric (2014), os fragmentos foram classificados como pertencentes ao morfotipo A4. Esses carvões apresentam formas poligonais, com cantos arredondados ou subangulares, superfícies reticuladas e textura escura, com estruturação simples. O brilho intenso e homogêneo foi uma característica marcante observada. O morfotipo A4 está relacionado à queima de folhas decíduas de estratos arbóreos e de gramíneas.

A análise dos registros de macropartículas de carvão vegetal da Lagoa dos Coutos permitiu a identificação de quatro zonas distintas (Figura 29), definidas com base na variação do influxo de carvão ao longo da sequência sedimentar. Os picos de influxo de carvão (número de partículas/cm<sup>2</sup>/ano) não refletem eventos individuais de incêndio, mas sim, tendências de maior ou menor frequência de fogo ao longo do tempo. Amostras com alto influxo de carvão indicam períodos com maior recorrência de incêndios, enquanto aquelas com baixo influxo sugerem épocas de menor atividade de fogo.

1. Zona 1 (124 a 88 cm; 70.476 – 52.195 anos cal AP; 37 amostras):

Durante este intervalo, registrou-se um influxo significativo de partículas de carvão, especialmente entre 70.476 e 60.409 anos cal AP (Figura 29). Os valores de influxo de carvão variaram entre 0,0077 e 0,080 partículas/cm<sup>2</sup>/ano, enquanto a área total de carvão vegetal oscilou entre 0,00012 e 0,007 mm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/ano.

Conforme dados de Vachula *et al.* (2021), a razão comprimento/largura (C/L) das partículas é utilizada como *proxy* para inferir o tipo de combustível queimado. Valores

de C/L acima de 3,5 indicam predominância de combustíveis não lenhosos (ervas, gramíneas ou gramíneas/arbustos), enquanto valores inferiores a 3,5 caracterizam combustíveis lenhosos (subarbustos, árvores ou árvores/arbustos).

A relação C/L apresentou valores entre 1,022 e 8,372 (Figura 29). Os valores médios de C/L permanecem abaixo de 3,5, indicando um regime de fogo contínuo com predominância de combustíveis lenhosos, como árvores e arbustos. Valores elevados isolados, como 8,372, 6,588 e 5,675, podem ser atribuídos à queima de gramíneas, sugerindo episódios pontuais com maior contribuição de vegetação herbácea.

A análise do tamanho das partículas permitiu inferir a origem dos fragmentos, distinguindo entre fontes locais, extralocais ou regionais. A maioria dos fragmentos apresenta dimensões reduzidas, inferiores a  $0,15 \text{ mm}^2$ , sugerindo transporte aéreo de longa distância e incêndios ocorridos fora da bacia hidrográfica da Lagoa dos Coutos. Por outro lado, a presença de fragmentos maiores, entre  $0,15 \text{ mm}^2$  e  $0,35 \text{ mm}^2$ , evidencia episódios de fogo de origem local, ocorridos dentro da bacia ou em suas imediações.

## 2. Zona 2 (88 a 31 cm; 51.680 – 23.272 anos cal AP; 57 amostras):

Neste período, a ocorrência de incêndios apresentou variações expressivas, com alternância entre fases de altos influxos de carvão e períodos sem vestígios significativos de fogo. Os valores de influxo oscilaram entre 0,00387 e 0,0363 partículas/cm<sup>2</sup>/ano, e a área total de carvão variou entre 0,000058 e 0,02 mm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/ano (Figura 29).

A razão C/L apresentou variação entre 1,063 e 4,233 (Figura 29), com valores médios situando-se entre 1,175 a 2,823, indicando predominância de combustíveis lenhosos e, portanto, incêndios que afetaram principalmente a vegetação arbórea ao redor da Lagoa dos Coutos.

A maioria dos fragmentos possui dimensões inferiores a  $0,15 \text{ mm}^2$ , com exceção de um fragmento maior, de  $0,4 \text{ mm}^2$ . Esses dados indicam que as queimas ocorreram fora da bacia da Lagoa dos Coutos, em áreas próximas o suficiente para permitir o transporte aéreo de fragmentos finos até o local de deposição. A presença isolada de

um fragmento maior, sugere a ocorrência de um evento de fogo mais próximo da lagoa, embora possivelmente ainda fora dos limites da bacia.

3. Zona 3 (31 a 15 cm; 22.589 – 11.982 anos cal AP; 15 amostras):

Neste intervalo, os registros indicam uma acentuada redução na ocorrência de incêndios. Apenas um evento expressivo foi identificado, por volta de 15.945 anos cal AP, com influxo de 0,0025 partículas/cm<sup>2</sup>/ano e área total de 0,0000353 mm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/ano (Figura 29). A razão C/L foi de 1,499, apontando novamente para a predominância de combustíveis lenhosos.

O pequeno tamanho dos fragmentos, com área de 0,014 mm<sup>2</sup>, sugere que este evento teve caráter regional, com material transportado por via aérea a partir de áreas externas à bacia da Lagoa dos Coutos. Ainda que o registro sedimentar não aponte claramente para outros eventos, não se descarta a possibilidade de que incêndios tenham ocorrido, mas seus vestígios não foram preservados nos sedimentos analisados.

4. Zona 4 (15 a 0 cm; 11.045 anos cal AP – presente; 14 amostras):

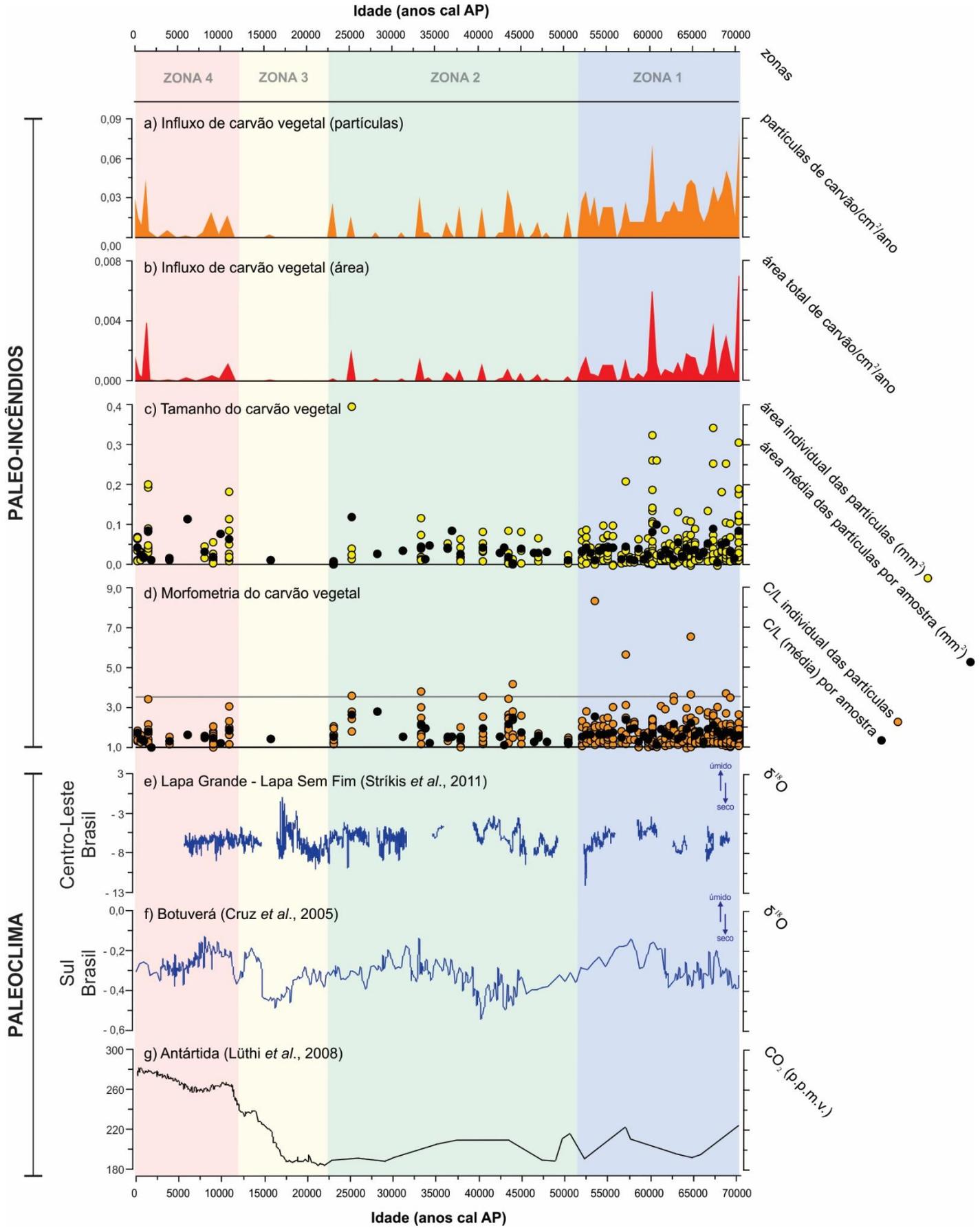
No período mais recente, observou-se um aumento expressivo na frequência de incêndios, evidenciado por picos de influxo de carvão em 11.045, 9.171, 1.565 e 943 anos cal AP, com valores de 0,017, 0,019, 0,044 e 0,029 partículas/cm<sup>2</sup>/ano, respectivamente (Figura 29). O intervalo geral de influxo variou entre 0,0018 e 0,049 partículas/cm<sup>2</sup>/ano, e a área total de carvão entre 0,000068 e 0,00383 mm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/ano.

A relação comprimento/largura (C/L) variou entre 1,042 e 4,674 (Figura 29), com médias entre 1,066 e 1,991. Esse padrão aponta para a predominância de incêndios que afetaram combustíveis lenhosos, como árvores e arbustos, embora valores acima de 3,5 indiquem episódios pontuais envolvendo também vegetação herbácea, caracterizando incêndios de superfície.

Quanto ao tamanho dos fragmentos, predominaram partículas com área inferior a 0,15 mm<sup>2</sup>, sugerindo origem extralocal, associada a transporte aéreo de longa distância. Entretanto, a presença de alguns fragmentos maiores, entre 0,15 mm<sup>2</sup> e 0,25 mm<sup>2</sup>,

reflete a ocorrência de eventos de fogo localizados, afetando diretamente o entorno da Lagoa dos Coutos.

Figura 29 (próxima página) – Diagrama de influxo de macropartículas de carvão vegetal da sequência sedimentar da Lagoa dos Coutos. São apresentados o número de partículas por  $\text{cm}^3$  e a área total de carvão ( $\text{mm}^2$ ); o tamanho das partículas, indicado por pontos amarelos (área individual das partículas, em  $\text{mm}^2$ ) e pontos pretos (área média por amostra); e a razão comprimento/largura (C/L), representada por pontos laranjas (valores individuais) e pontos pretos (valores médios por amostra). Os dados estão plotados em função da idade calibrada (anos cal AP). Adicionalmente, são apresentados dados paleoclimáticos comparativos obtidos de espeleotemas das cavernas Lapa Grande – Lapa Sem Fim (Stríkis *et al.*, 2011; Stríkis *et al.*, 2015), de Botuverá (Cruz *et al.*, 2005) e de testemunhos de gelo da Antártida (Lüthi *et al.*, 2008)



Fonte: Autor (2025).

### 5.3.2 Grãos de pólen, esporos e algas

A análise palinológica de quatro amostras selecionadas (LC 104–103, LC 71–70, LC 23–22 e LC 02–01) do testemunho sedimentar da Lagoa dos Coutos resultou na identificação de 30 tipos de grãos de pólen, 5 tipos de esporos de pteridófitas, monilófitas e briófitas, além de 6 tipos de esporos de algas. As respectivas fotomicrografias encontram-se apresentadas nas pranchas do Apêndice.

Os táxons polínicos foram organizados em diagramas de porcentagem (%) e concentração (grãos/cm<sup>3</sup>), classificados conforme suas características ecológicas (Figuras 30 e 31, respectivamente). Essa categorização considerou dois grupos principais: elementos arbóreos (árvores) e elementos não arbóreos, que englobam lianas/trepadeiras, ervas, subarbustos/arbustos e plantas aquáticas. As concentrações variaram significativamente entre as unidades analisadas, refletindo flutuações na abundância desses elementos ao longo do tempo registrado pelas amostras.

Além dos grãos de pólen, foram identificados esporos de pteridófitas, monilófitas, briófitas e algas. Embora esses grupos não tenham sido incluídos nos diagramas de porcentagem voltados à reconstituição da paleovegetação (Figura 30), foram considerados nas análises de concentração (Figura 32) devido à sua relevância na complementação das interpretações paleoambientais.

Os táxons também foram organizados em um quadro (Quadro 3), segundo sua forma de vida e ocorrência típica nos biomas Mata Atlântica e Cerrado, com base nas referências de Mendonça *et al.* (2008), Cassino & Meyer (2011) e Cassino *et al.* (2016).

Quadro 3 – Identificação taxonômica dos tipos de grãos de pólen, suas formas de vida e ocorrência típica nos biomas Mata Atlântica e Cerrado

TÁXON	FORMA DE VIDA	AMBIENTES TÍPICOS DE OCORRÊNCIA
Alismataceae - <i>Echinodorus</i>	Erva aquática	Áreas alagadas e/ou margens de corpos d'água (lago, lagoa, brejo e/ou pântano)
Amaranthaceae	Erva/Arbusto	Campos rupestres, Cerrado ( <i>Sensu Lato</i> )
Aquifoliaceae - <i>Ilex</i>	Árvore	Matas de galeria, Matas ciliares, Veredas
Araliaceae - <i>Schefflera</i>	Arbusto/Árvore	Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa), Matas de galeria, Matas ciliares
Araucariaceae - <i>Araucaria</i>	Árvore	Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Mista, Floresta Montana, Floresta Estacional Semidecidual)
Arecaceae	Árvore	Cerrado (Campo Cerrado, Campo Sujo, Cerradão), Matas de galeria
Asteraceae	Erva/Arbusto	Todas as fisionomias
Begoniaceae	Erva/Subarbusto	Mata Atlântica (Floresta Montana, Floresta Estacional Semidecidual), Matas de encosta, Matas de galeria, Matas ciliares, Campos Rupestres
Bignoniaceae - Tipo <i>Amphilophium</i>	Liana (Trepadeira)	Mata Atlântica, Matas de galeria, Matas ciliares, Cerrado ( <i>Sensu Stricto</i> , Cerradão)
Burseraceae - <i>Protium</i>	Árvore	Matas de galeria, Pântanos, Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa), Veredas
Cannabaceae - <i>Celtis</i>	Árvore/Arbusto	Matas de galeria, Matas ciliares, Cerrado ( <i>Sensu Lato</i> ), Florestas secas
Cannabaceae - <i>Trema</i>	Árvore/Arbusto	Matas de galeria, Matas ciliares, Capoeira, Cerrado ( <i>Sensu Lato</i> )
Chloranthaceae - <i>Hedyosmum</i>	Arbusto/Árvore	Mata Atlântica (Floresta Úmida), Matas de galeria, Pântano
Cunoniaceae - <i>Weinmannia</i>	Árvore/Arbusto	Mata Atlântica (Floresta Úmida de Altitude), Matas de galeria, Matas ciliares, Matas de encosta
Convolvulaceae	Liana/Erva	Várias fisionomias
Cyperaceae	Erva	Pântanos, Cerrado (Campo Cerrado, Campo sujo), Veredas
Euphorbiaceae - <i>Alchornea</i>	Arbusto/Árvore	Várias fisionomias
Euphorbiaceae - <i>Aparisthium</i>	Arbusto/Árvore	Várias fisionomias
Lythraceae - <i>Cuphea</i>	Erva/Subarbusto	Matas de galeria, Pântanos, Veredas
Melastomataceae	Erva/Arbusto/Árvore	Várias fisionomias
Myrtaceae	Árvore/Arbusto	Várias fisionomias, com maior abundância em matas de galeria
Myrtaceae - <i>Eucalyptus</i>	Árvore	-
Poaceae	Erva (Gramínea)	Todas as fisionomias
Podocarpaceae - <i>Podocarpus</i>	Árvore	Matas ciliares, Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Montana), Florestas secas
Primulaceae - <i>Myrsine</i>	Árvore/Arbusto	Matas de galeria, Matas ciliares, Veredas, Florestas secas
Proteaceae - <i>Roupala</i>	Árvore	Matas de galeria, Cerradão, Cerrado ( <i>Sensu Lato</i> ), Florestas secas, Campos

Rhamnaceae - Tipo <i>Ziziphus</i>	Arbusto/Árvore	Cerrado (Cerradão, Campo sujo), Capoeira, Florestas secas
Rubiaceae - <i>Borreria</i>	Erva/Subarbusto	Campos, Cerrado ( <i>Stricto Sensu</i> , Cerradão), Capoeira
Symplocaceae - <i>Symplocos</i>	Árvore/Arbusto	Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa), Matas de galeria, Matas ciliares
Urticaceae - <i>Cecropia</i>	Árvore	Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Semidecidual), Matas de galeria, Veredas, Cerrado (Campo Cerrado), Capoeira
Winteraceae - <i>Drimys brasiliensis</i>	Árvore	Mata Atlântica (Floresta Úmida de Altitude, Floresta Ombrófila Densa), Matas ciliares

Fonte: Autor (2025).

### 1. Amostra LC 104-103 (103 cm; 60.409 anos cal AP; Zona 1):

A vegetação herbáceo-arbustiva dominou esta amostra, representando 71,8% do total polínico. Destacaram-se Poaceae (47,4%) e Asteraceae (21,7%), seguidos por Cyperaceae (1,7%), *Borreria* (0,7%) e Convolvulaceae (0,3%).

Os elementos arbóreos corresponderam a 28,2%, sendo Myrtaceae (11,3%) e Melastomataceae (5,7%) os mais expressivos, além de *Myrsine* (4,3%), *Symplocos* (2%), *Weinmannia* (2%), *Roupala* (1,3%), *Araucaria* (1%), *Podocarpus* (0,3%) e *Drymis brasiliensis* (0,3%).

As concentrações de pólen foram elevadas, com destaque para as famílias Poaceae (57.190 grãos/cm<sup>3</sup>) e Asteraceae (26.178 grãos/cm<sup>3</sup>).

Entre os esporos, predominou o gênero *Blechnum*, seguido de *Polypodium*. No grupo das algas, *Botryococcus* foi o mais abundante, acompanhado de *Pseudoschyzaea*.

### 2. Amostra LC 71-70 (70 cm; 43.627 anos cal AP; Zona 2):

Mantém-se a predominância da vegetação herbáceo-arbustiva, que somou 80,9% do total polínico, com Poaceae (54,9%) e Asteraceae (21,4%) como os principais representantes. Também foram registrados *Borreria* (2,3%), Cyperaceae (1,1%), Amaranthaceae (0,4%), Begoniaceae (0,4%) e *Cuphea* (0,4%).

Os elementos arbóreos reduziram-se a 19,1%, com decréscimos nos valores de Myrtaceae (5,3%) e *Weinmannia* (1,5%), além do desaparecimento de táxons como *Symplocos*, *Roupala*, *Araucaria*, *Podocarpus* e *Drymis brasiliensis*. Por outro lado,

observou-se aumento de Melastomataceae (7,5%) e *Myrsine* (4,5%), além do registro de *Ilex* (0,3%).

Houve uma queda nas concentrações de pólen em comparação com a amostra anterior: Poaceae (27.671 grãos/cm<sup>3</sup>) e Asteraceae (10.803 grãos/cm<sup>3</sup>). Tendência também observada nos demais táxons.

Foram identificados esporos de *Blechnum*, *Polypodium*, Tipo *Adiantum* e *Cyathea*. No grupo das algas, manteve-se a presença de *Botryococcus* e *Pseudoschyzaea*, com acréscimo de *Zygnema*.

### 3. Amostra LC 23-22 (22 cm; 17.508 anos cal AP, Zona 3):

A vegetação herbáceo-arbustiva manteve-se dominante, com 80,4% do espectro polínico, sendo Poaceae (59,6%) e Asteraceae (18,4%) os principais táxons. Cyperaceae apresentou aumento relativo (2,4%). Táxons como Convolvulaceae, *Borreria*, Amaranthaceae, Begoniaceae e *Cuphea* desapareceram do registro.

Os elementos arbóreos corresponderam a 19,6% do espectro polínico, com aumento da diversidade em relação à amostra anterior. Destacaram-se Myrtaceae (4,8%), Arecaceae (4,1%), Melastomataceae (3,4%) e *Myrsine* (2,0%), além de *Alchornea* (1,7%), *Celtis* (1,1%), *Hedyosmum* (1,0%), *Protium* (0,7%), *Trema* (0,4%) e *Symplocos* (0,4%).

A concentração de pólen sofreu novo declínio: Poaceae (26.430 grãos/cm<sup>3</sup>) e Asteraceae (8.155 grãos/cm<sup>3</sup>). A diminuição na concentração foi também verificada para os demais táxons.

Nos esporos, foram registrados *Blechnum*, *Polypodium*, Tipo *Adiantum*, *Cyathea* e, de forma inédita, esporos de briófitas do gênero *Phaeoceros*.

O registro de algas foi o mais expressivo entre todas as amostras, com abundância de *Zygnema* e presença de *Botryococcus*, *Pseudoschyzaea*, *Debarya*, *Spyrogira* e *Chlamydomonas*, indicando elevada diversidade e produtividade aquática.

### 4. Amostra LC 02-01 (01 cm; 343 anos cal AP, Zona 4):

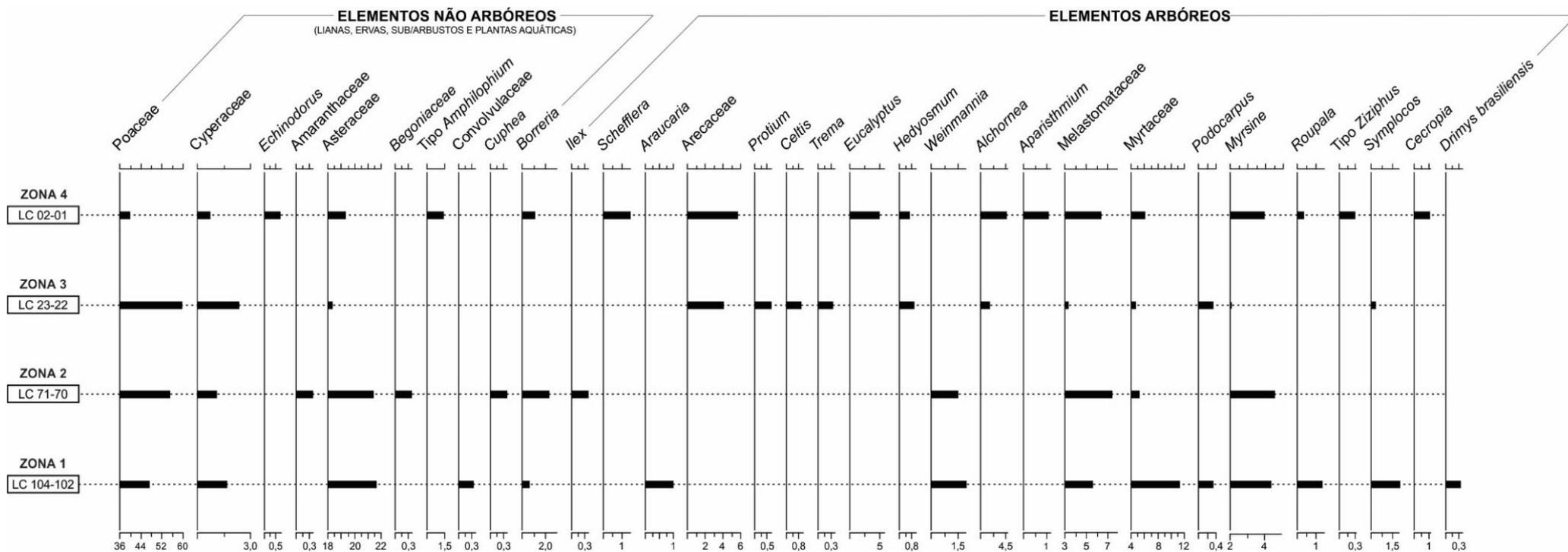
Embora ainda dominada por elementos herbáceo-arbustivos (63,1%), essa amostra apresentou redução dos percentuais de Poaceae (39,8%) e Asteraceae (19,4%) em relação às anteriores. Cyperaceae (0,7%) e *Borreria* (1,1%) mantiveram-se estáveis. Destaca-se o aparecimento dos táxons Tipo *Amphilophium* (1,4%) e *Echinodorus* (0,7%).

Os elementos arbóreos aumentaram proporcionalmente, representando 36,9% do total polínico. Foram identificados Melastomataceae (6,5%), Myrtaceae (6,09%), Arecaceae (5,7%), *Eucalyptus* (5,0%), *Alchornea* (4,7%), *Myrsine* (3,9%), *Schefflera* (1,4%), *Cecropia* (1,1%), *Aparisthium* (1,1%), *Hedyosmum* (0,7%), *Roupala* (0,4%) e Tipo *Ziziphus* (0,4%). Desapareceram *Celtis*, *Protium*, *Trema* e *Symplocos*.

As concentrações de pólen voltaram a se elevar: Poaceae (41.266 grãos/cm<sup>3</sup>) e Asteraceae (20.075 grãos/cm<sup>3</sup>), tendência observada também nos demais táxons.

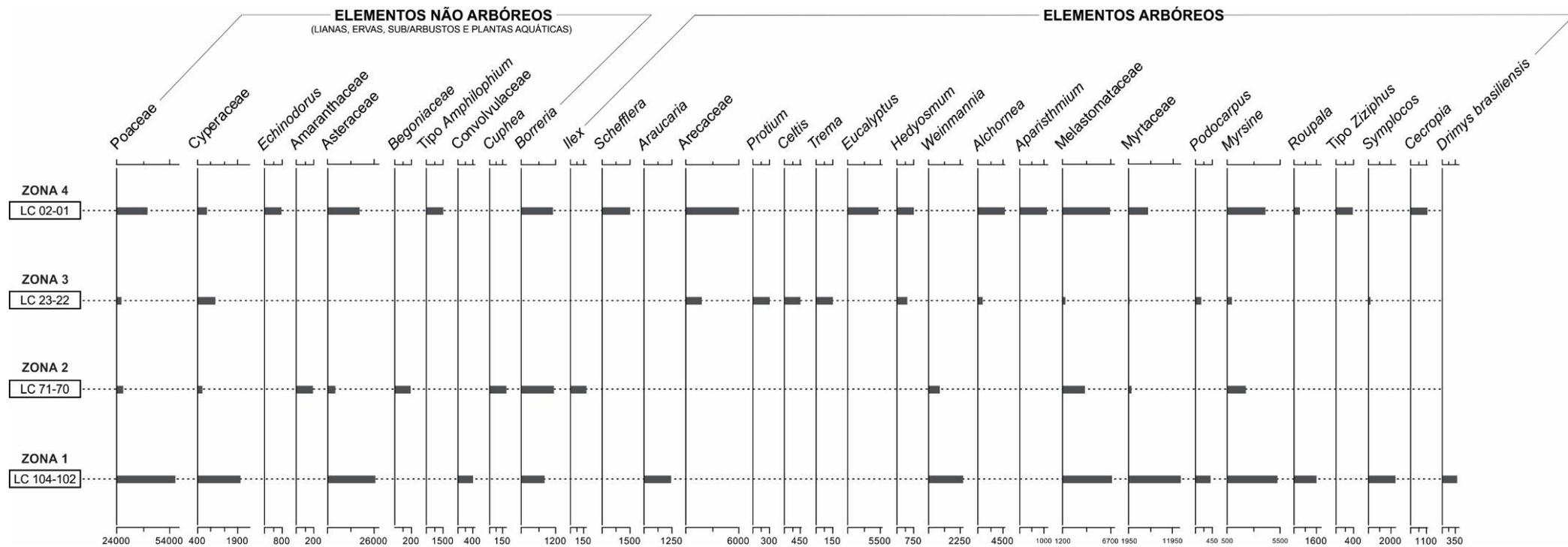
Foram registrados esporos de *Blechnum*, *Polypodium*, Tipo *Adiantum* e *Cyathea*. O registro de algas manteve-se elevado, com *Botryococcus*, *Zygnema*, *Pseudoschyzaea* e *Spyrogira*.

Figura 30 - Diagrama de porcentagem dos elementos não arbóreos - lianas, ervas, subarbustos e arbustos, e elementos arbóreos (LC 104-103, LC 71-70, LC 23-22 e LC 02-01: amostras polínicas)



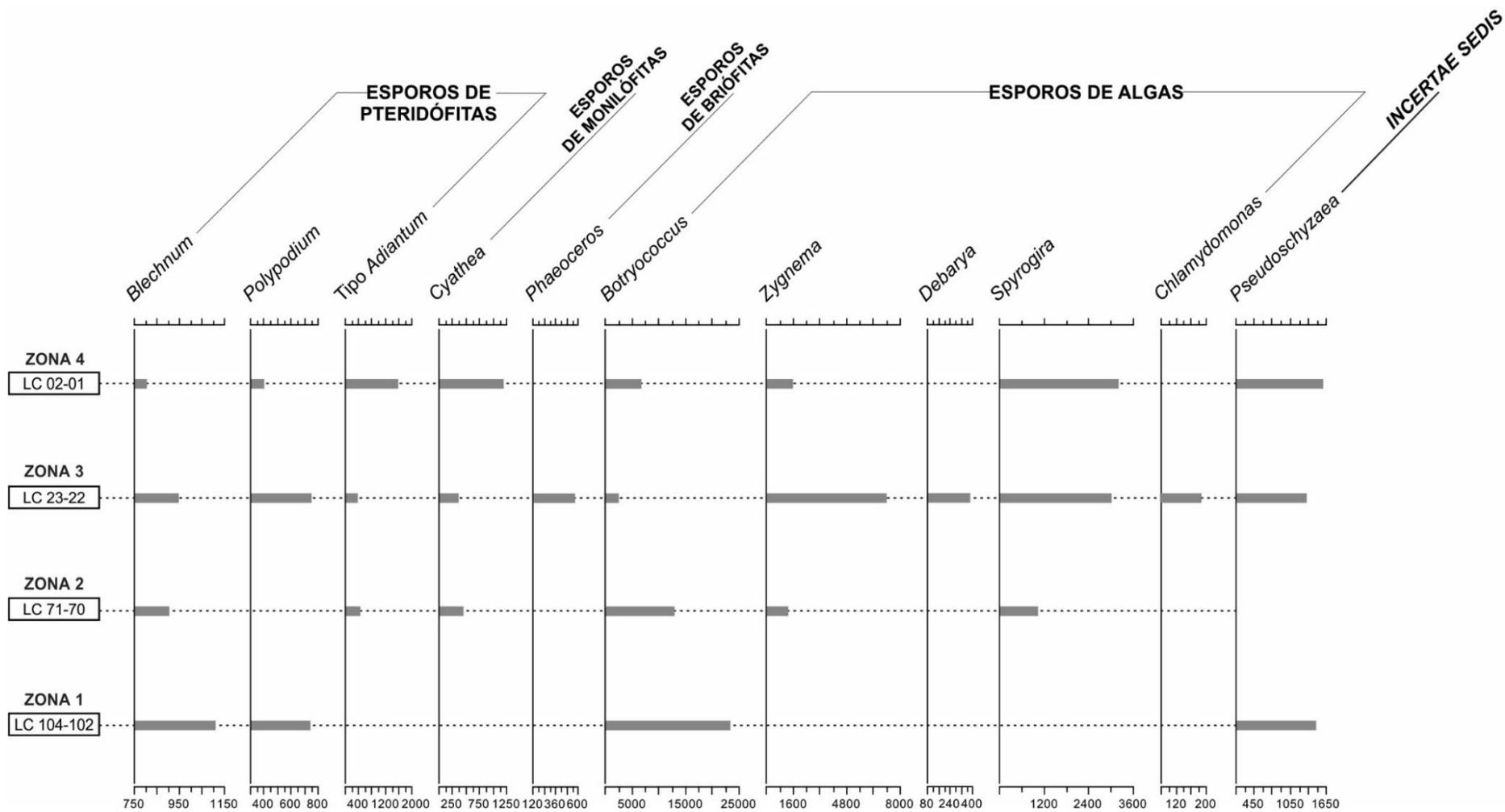
Fonte: Autor (2025).

Figura 31 - Diagrama de concentração dos elementos não arbóreos - lianas, ervas, subarbustos, arbustos, e plantas aquáticas, e elementos arbóreos (LC 104-103, LC 71-70, LC 23-22 e LC 02-01: amostras polínicas)



Fonte: Autor (2025).

Figura 32 - Diagrama de concentração dos esporos de pteridófitas, esporos de monilófitas, esporos de briófitas, esporos de algas e Incertae Sedis (LC 104-103, LC 71-70, LC 23-22 e LC 02-01: amostras polínicas)



Fonte: Autor (2025).

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 Interpretação paleoecológica do registro da Lagoa dos Coutos

As alterações observadas nos dados polínicos e nas macropartículas de carvão vegetal do testemunho sedimentar da Lagoa dos Coutos evidenciam mudanças significativas na dinâmica do lago, da vegetação e no regime de fogos ao longo do Quaternário Tardio.

#### 1. Zona 1 (70.476–52.195 anos cal AP):

A deposição lacustre da Lagoa dos Coutos teve início por volta de 70.476 anos cal AP, durante o Pleistoceno Superior, no Pleniglacial (75.000 – 30.000 anos cal AP) da última glaciação (Würm). Neste período, a paisagem circundante era composta por um mosaico de formações florestais, savânicas, campestres e áreas alagadas.

A análise palinológica da amostra LC 104-103 indica a ocorrência de florestas semideciduais e montanas, típicas da Mata Atlântica. O registro polínico revela táxons adaptados a ambientes frios, como *Weinmannia*, *Drimys brasiliensis* e *Podocarpus* – este último, uma conífera tropical frequentemente encontrada em áreas montanhosas e de temperaturas reduzidas (Raczka *et al.*, 2013). A presença de *Araucaria*, indicativa de temperaturas amenas, baixa sazonalidade e umidade relativamente estável (Behling & Lichte, 1997; Ledru *et al.*, 1996), reforça essa interpretação. Esses dados são corroborados por registros de CO<sub>2</sub> atmosférico provenientes de núcleos de gelo, que apontam episódios de resfriamento global durante o Pleniglacial (Lüthi *et al.*, 2008) (Figura 29).

A presença de grãos de pólen de Myrtaceae, *Myrsine*, *Roupala*, *Symplocos* e esporos de pteridófitas indica o desenvolvimento de matas ciliares e de galeria bem estruturadas. Como muitas espécies de Myrtaceae preferem ambientes úmidos (Lorenzi, 1992), é provável que esses ambientes tenham sido favorecidos por episódios de aumento da umidade regional. Esses eventos podem estar associados, dentro das margens de erro das datações, às variações centenárias de precipitação registradas nos espeleotemas das cavernas de Lapa Grande, Lapa Sem Fim (Stríkis *et al.*, 2011; Stríkis *et al.*, 2015) e Botuverá (Cruz *et al.*, 2005) (Figura 29).

As elevadas frequências de Poaceae e Asteraceae indicam a presença de paisagens abertas ao redor da lagoa, como cerradões e campos rupestres. Considerando a morfologia da Serra do Gandarela – marcada por morros com encostas íngremes que cercam a lagoa –, é plausível que os grãos de pólen de Poaceae e Cyperaceae tenham origem majoritária em espécies herbáceas de ambientes abertos, e não de plantas aquáticas, corroborado pela baixa representação de táxons aquáticos no polínico. Por outro lado, a abundância de algas sugere a existência de uma lâmina d'água relativamente rasa, favorável à proliferação desses organismos.

O regime de fogos foi bastante intenso nesse intervalo, como indicado pelo elevado influxo de partículas de carvão vegetal (Figura 29). Esse padrão pode estar associado as condições climáticas sazonais. Períodos de maior precipitação, seguidos de estações secas, propiciam o crescimento de biomassa que, ao secar, se torna combustível para incêndios. Além disso, sob condições de seca mais prolongada, a probabilidade de queimadas mais extensas aumenta. Dois mecanismos principais contribuem para a ignição natural dos incêndios: (1) o acúmulo de biomassa durante a estação chuvosa, seguido de sua secagem na estação seca; e (2) o aumento na frequência de tempestades com raios, principal agente natural de ignição (Follador, 2022).

O principal combustível desses incêndios foi o estrato arbóreo, embora a vegetação herbácea também tenha desempenhado um papel relevante. Os chamados fogos de superfície, típicos do Cerrado, ocorrem em gramíneas e outras herbáceas, cuja biomassa seca se torna altamente inflamável durante a estação seca (Miranda, 2010). A recorrência desses incêndios pode ter favorecido a expansão de espécies herbáceas em detrimento de formações florestais, promovendo alterações estruturais na vegetação regional.

## 2. Zona 2 (51.680–23.272 anos cal AP)

Durante esse intervalo, a paisagem manteve elevada diversidade fitofisionômica, com a presença de florestas semidecíduais e montanas, campos rupestres e formações savânicas, como cerrado *stricto sensu* e cerradão. Contudo, os dados da amostra LC 71-70 indicam uma retração das florestas e expansão da vegetação herbácea e das gramíneas, sugerindo um ambiente mais seco e com maior sazonalidade. Essa

transição está alinhada à intensificação dos ciclos glaciais e interglaciais do Pleistoceno Tardio, que resultaram em oscilações térmicas e hidrológicas significativas (Ledru *et al.*, 1996). Registros de pluviosidade obtidos nas cavernas de Lapa Grande e Lapa Sem Fim (Stríkis *et al.*, 2011; Stríkis *et al.*, 2015), bem como do espeleotema de Botuverá (Cruz *et al.*, 2005), corroboram essa dinâmica.

Dados paleoclimáticos provenientes de amostras de ar aprisionadas no gelo da Antártida (Lüthi *et al.*, 2008) revelam oscilações milenares nas concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico, refletindo diretamente os ciclos de resfriamento (glaciais) e aquecimento (interglaciais) (Figura 29). Segundo Corrêa (2021), o resfriamento global associado às glaciações intensificou a aridez, desacelerando o ciclo hidrológico e impactando diretamente a dinâmica da vegetação. Durante períodos de seca prolongada e estações chuvosas reduzidas, as florestas de grande porte recuaram, sendo ciclicamente substituídas por vegetação herbácea e gramíneas.

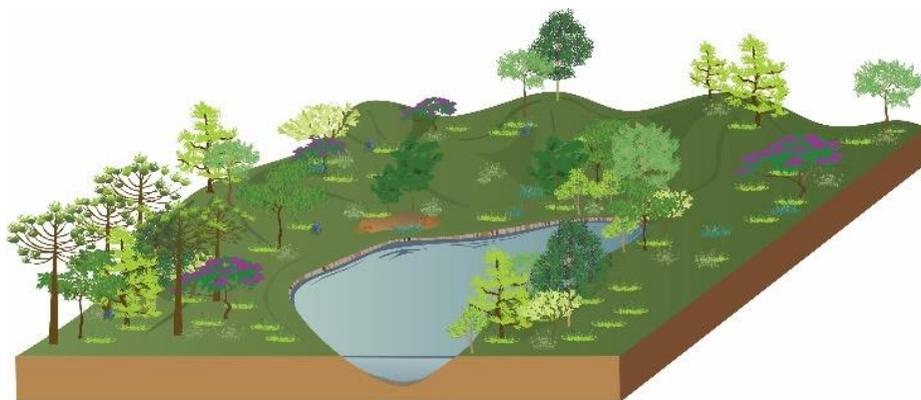
O registro polínico ainda inclui táxons arbóreos como *Weinmannia*, *Myrsine* e *Ilex*, indicando a persistência de condições frias. *Ilex*, sensível à umidade (Rodríguez-Zorro *et al.*, 2002), em conjunto com outros táxons tolerantes ao frio, sugere que oscilações climáticas acentuadas — com predomínio de temperaturas mais baixas — continuaram a ocorrer. A coexistência de espécies adaptadas ao frio com táxons típicos de ambientes quentes e úmidos, como Melastomataceae e Myrtaceae, revela episódios de aquecimento e aumento da umidade. Durante esses períodos, matas ciliares e de galeria atuaram como refúgios hídricos para espécies sensíveis à seca, como *Cuphea* e representantes da família Begoniaceae.

A abundância de Poaceae e Asteraceae reforça a dominância de ambientes abertos e secos. Essa assembleia polínica é comparável às formações de estepe-matagal observadas na Patagônia argentina (39°S a 46°S) sob condições frias e áridas (Schäbitz, 1994). A ocorrência de *Borreria* (Rubiaceae), típica de pastagens secas, também reforça a forte sazonalidade climática.

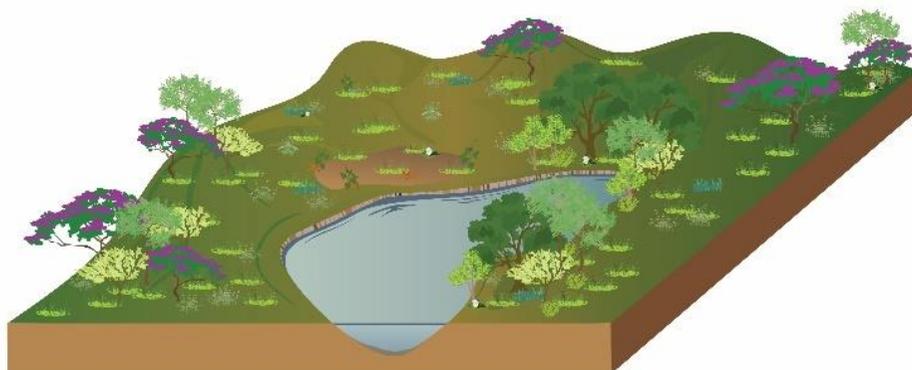
Os registros de partículas de carvão vegetal indicam a ocorrência de incêndios, embora com menor intensidade em comparação à fase anterior. É plausível que sua frequência estivesse relacionada à sazonalidade climática, caracterizada pela alternância entre estações secas e úmidas. Durante os períodos mais secos, a

escassez de umidade, associada à redução da cobertura vegetal, favoreceu o desenvolvimento de paisagens abertas, dominadas por vegetação savânica, criando condições propícias para queimadas mais intensas. Por outro lado, nas fases mais úmidas, a predominância de formações florestais densas, estimulada por elevados índices pluviométricos, provavelmente limitou a propagação do fogo — em concordância com os registros mais úmidos observados na caverna de Botuverá (Cruz *et al.*, 2005). Dessa forma, o regime de fogo oscilava em resposta às condições climáticas, atuando como agente de distúrbio e influenciando diretamente a composição e a distribuição da vegetação.

Figura 33 - Representação esquemática da paisagem reconstruída a partir dos conjuntos polínicos das amostras LC 104-103 (60.409 anos cal AP) e LC 71-70 (43.627 anos cal AP)

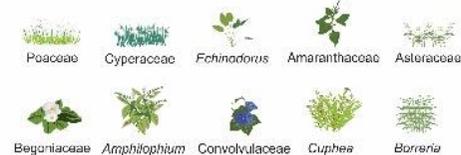


60.409 anos cal AP  
Zona 1

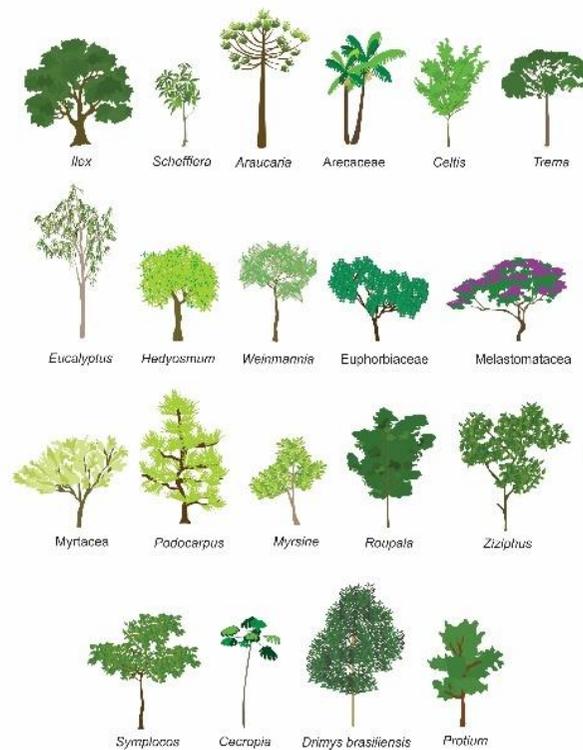


43.627 anos cal AP  
Zona 2

**ELEMENTOS NÃO ARBÓREOS**  
(Lianas, Ervas, Sub/Arbustos e Plantas Aquáticas)



**ELEMENTOS ARBÓREOS**



Fonte: Autor (2025).

### 3. Zona 3 (22.589 – 11.982 anos cal AP)

Esse intervalo, correspondente ao final do Pleistoceno e início do Holoceno — especialmente ao Pleniglacial Tardio —, abrange a fase conhecida como Último Máximo Glacial (UMG), iniciada entre 21.000 e 19.000 anos cal AP. A partir desse período, o clima passou por intensas transformações, marcadas por uma acentuada queda nas temperaturas.

Registros da Antártida (Lüthi *et al.*, 2008) indicam a predominância de condições frias entre 30.000 a 19.000 anos cal AP, no final do Pleistoceno (Figura 29). Segundo Corrêa (2021), o acúmulo de gelo nas calotas polares e mantos continentais atingiu seu ápice, provocando quedas expressivas nos níveis de oceanos e lagos ao redor do globo. Durante esse período, as concentrações de CO<sub>2</sub> permaneceram excepcionalmente baixas por milhares de anos, intensificando o resfriamento global.

Contudo, o início do UMG também marcou o estabelecimento de um regime climático mais úmido, cuja tendência de aumento da umidade se manteve até os dias atuais. Registros isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}$ ) obtidos em espeleotemas das cavernas de Lapa Grande e Lapa Sem Fim (Stríkis *et al.*, 2011; Stríkis *et al.*, 2015) mostram aumentos súbitos na umidade em escalas de tempo relativamente curtas (Figura 29). Essas condições favoreceram o retorno de florestas estacionais semidecíduais e a expansão de vegetação úmida e fria, como as florestas montanas dominadas por *Podocarpus* (Raczka *et al.*, 2013), táxon identificado na amostra LC 23-22.

A assembleia polínica da amostra LC-23-22 revela uma combinação de elementos característicos de climas frios, como *Podocarpus*, coexistindo com táxons típicos de florestas tropicais, como Myrtaceae, Arecaceae e *Protium*. Essa associação teria ocorrido na forma de mosaicos florestais ou de comunidades vegetais não análogas (Overpeck *et al.*, 1992). A presença de *Alchornea* (Euphorbiaceae), *Myrsine* e *Celtis*, indicativas de matas ciliares e de galeria, sugere a expansão dessas fitofisionomias sobre as áreas circundantes da Lagoa dos Coutos.

Estudos ecológicos da vegetação atual do Cerrado interpretam que a cobertura vegetal é fortemente condicionada pela disponibilidade hídrica do solo. Assis *et al.* (2010), por exemplo, demonstraram que, quando a fertilidade do solo é constante, a

umidade disponível no solo torna-se o principal fator determinante do gradiente entre savanas abertas e florestas mais densas. Nesse contexto, as formações savânicas do Cerrado parecem ter persistido de forma restrita, especialmente em encostas e morros ao longo da Serra do Gandarela, onde o lençol freático se mantinha mais profundo. Essa limitação hídrica possivelmente inibiu o desenvolvimento de comunidades herbáceas, como sugere a menor concentração de grãos de pólen de gramíneas no registro da Zona 3 – ainda que Poaceae e Asteraceae continuem representadas.

Os períodos de maior precipitação registrados contribuíram para a elevação do nível da lagoa, evidenciada pela maior abundância de esporos, além do aumento na concentração de algas e de Cyperaceae em comparação às fases anteriores. Esses dados sugerem um ambiente lacustre mais profundo e estável, associado a fases prolongadas de recarga hídrica.

Outro dado relevante refere-se à presença extremamente reduzida — ou mesmo à ausência — de macropartículas de carvão vegetal. A escassez de evidências de regime de fogos pode estar associada a condições ecológicas predominantemente úmidas em diversas fases desse período, com solos saturados por longos intervalos, o que teria inibido a ocorrência e a propagação de incêndios. Essa interpretação é corroborada por Gosling *et al.* (2021), que destacam a influência de múltiplos fatores na deposição e preservação de vestígios de fogo, incluindo a umidade da vegetação e do solo, a direção e velocidade dos ventos, a configuração geográfica do ambiente deposicional — como a profundidade do lago e a presença de entradas e saídas de água —, além do tipo de queima (florestal ou não florestal).

#### 4. Zona 4 (11.045 anos cal AP – presente)

O Holoceno, atual período interglacial, teve início há aproximadamente 11.700 anos cal AP, marcando a transição do resfriamento abrupto do *Younger Dryas* — uma oscilação climática de duração milenar que pontuou o término do Último Período Glacial, entre 12.900 e 11.700 anos cal AP — para o estabelecimento de condições climáticas mais quentes (Broecker *et al.*, 2010; Wanner *et al.*, 2014). Registros de CO<sub>2</sub> extraídos de núcleos de gelo da Antártida (Figura 29) indicam uma tendência de aquecimento global após o Último Máximo Glacial (UMG).

Embora as transições entre fases não serem claramente definidas, o Holoceno é comumente subdividido em quatro períodos: o Holoceno Inicial, entre cerca de 11.700 e 7.000–8.000 anos cal AP, marcado por aquecimento gradual; o Holoceno Médio, entre 7.000–8.000 a 4.000–5.000 anos cal AP, com temperaturas mais elevadas; o Holoceno Tardio, de 4.000–5.000 anos cal AP até o século XIX, caracterizado por resfriamento; e a fase contemporânea, associada ao aquecimento induzido pela atividade humana desde a Era Industrial, iniciada por volta de 1850 d.C. (Wanner *et al.*, 2014). No Brasil, as análises isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  do sítio de Botuverá (Cruz *et al.*, 2005) indicam um regime mais seco durante o Holoceno Inicial e Médio, seguido por aumento da umidade no Holoceno Tardio (Figura 29). A partir de então, estabeleceu-se um padrão climático predominantemente úmido a subúmido, que se persiste até os dias atuais.

Os dados polínicos da Zona 4 revelam a abertura de florestas tropicais semidecíduais e montanas, além dos campos rupestres, acompanhada pela expansão de vegetação savânica. Esse processo inclui o avanço de cerradões em encostas e elevações, bem como cerrado típico nos topos de morros. A transformação da paisagem ocorreu sob condições ainda úmidas, conforme indicado pela presença de táxons higrófilos — *Schefflera*, Myrtaceae e Melastomataceae — na amostra LC 02-01. A associação com *Hedyosmum* reforça a existência de matas de galeria sujeitas a inundações periódicas por corpos d'água, especialmente durante a estação chuvosa (Ribeiro & Walter, 2008).

A presença de tipos polínicos como *Cecropia* e *Borreria* reforça a ocorrência de ambientes savânicos abertos, sujeitos a perturbações climáticas (Berg, 1977). *Cecropia*, planta pioneira de crescimento rápido, é típica de áreas abertas ou em regeneração, sendo indicativa de clareiras florestais. Quando associada à presença de Arecaceae, essa composição florística pode sugerir os primeiros indícios de influência antrópica na vegetação (Bush, 2002).

Essa hipótese é corroborada pela identificação de grãos de pólen de *Eucalyptus*, espécie exótica originária da Austrália, cuja introdução no Brasil está diretamente ligada à atividade humana. Seu registro nas camadas superficiais do sedimento representa evidência clara de interferência antrópica recente no ecossistema da

Lagoa dos Coutos. O gênero *Eucalyptus* é amplamente reconhecido como um exemplo clássico de dispersão vegetal promovida por ações humanas em escala global (Júnior, 2011).

As transformações ecológicas do Holoceno também se refletem no aumento da atividade de fogo durante a fase correspondente à Zona 4, evidenciado pelas elevadas taxas de influxo de partículas de carvão vegetal (Figura 29). Esse padrão indica intensificação das queimadas, cujos regimes são condicionados por diversos fatores, entre eles o tipo de vegetação, frequentemente moldado por uma história coevolutiva com o fogo. Diversos autores discutem as causas potenciais desses incêndios no passado. Em ecossistemas savânicos, como o Cerrado brasileiro, os raios são a causa natural mais plausível. Behling (1995) confirma essa ideia ao demonstrar que muitas espécies típicas do Cerrado se adaptaram ao fogo ao longo do Holoceno, sendo a frequência das queimadas um dos principais fatores responsáveis pela manutenção da fisionomia e da distribuição desse bioma.

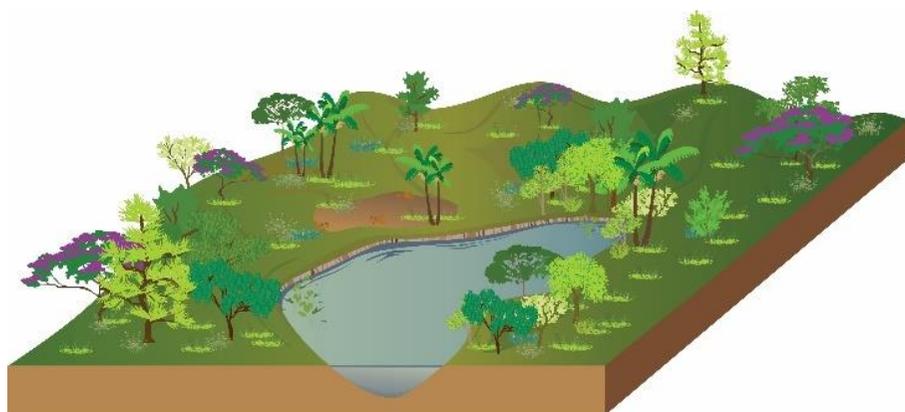
Em contraste, florestas tropicais úmidas, como a Mata Atlântica, não apresentam adaptações evolutivas ao fogo, e suas espécies, em geral, não possuem mecanismos de resistência ou regeneração pós-incêndios. Fora de eventos climáticos extremos, esses ambientes raramente são afetados por incêndios naturais, devido à alta umidade e à escassez de material combustível. Nessas formações, os intervalos naturais de retorno do fogo são estimados em centenas ou até milhares de anos (Uhl & Kauffmann, 1990). Hueck (1966) observa que “ilhas” de Cerrado podem ocorrer isoladamente em áreas de floresta estacional e que, na ausência de fogo, formações florestais mais densas tenderiam a expandir-se sobre essas áreas, dada à falta de adaptações ao fogo por parte das espécies florestais.

Além dos incêndios naturais, a ação humana também deve ser considerada um fator importante na intensificação dos eventos de fogo no Holoceno Tardio. Evidências arqueológicas indicam a presença humana no Brasil Central há mais de 10.000 anos cal AP (Mendes, 1970), como demonstram achados na Serra do Cipó (MG), incluindo, esqueletos humanos datados de cerca de 12.000 anos cal AP (Schmitz, 1994). Estudos etnoecológicos recentes apontam que descendentes de populações

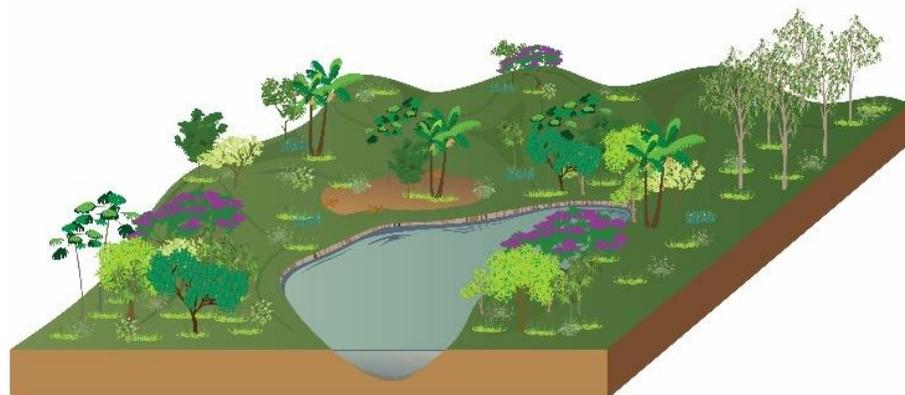
ameríndias no Brasil desenvolveram técnicas específicas de uso controlado do fogo (Pivello, 2011; Melo, 2007).

Segundo Cassino *et al.* (2023), sítios arqueológicos do Vale do Peruaçu, no noroeste de Minas Gerais, evidenciam mudanças na ocupação humana a partir de aproximadamente 2.000 anos cal AP, com a chegada das primeiras populações horticultoras. É provável que essas comunidades tenham empregado o fogo como ferramenta de manejo agrícola, contribuindo para o aumento da frequência e da intensidade dos incêndios na região. Dessa forma, embora os registros de carvão vegetal da Lagoa dos Coutos indiquem causas naturais como fator predominante nas fases iniciais, o acréscimo na intensidade e na recorrência dos eventos de fogo durante o Holoceno Tardio também reflete a crescente influência antrópica sobre a paisagem.

Figura 34 - Representação esquemática da paisagem reconstruída a partir dos conjuntos polínicos das amostras LC 23-22 (17.508 anos cal AP) e LC 02-01 (343 anos cal AP)

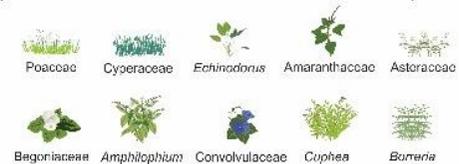


17.508 anos cal AP  
Zona 3

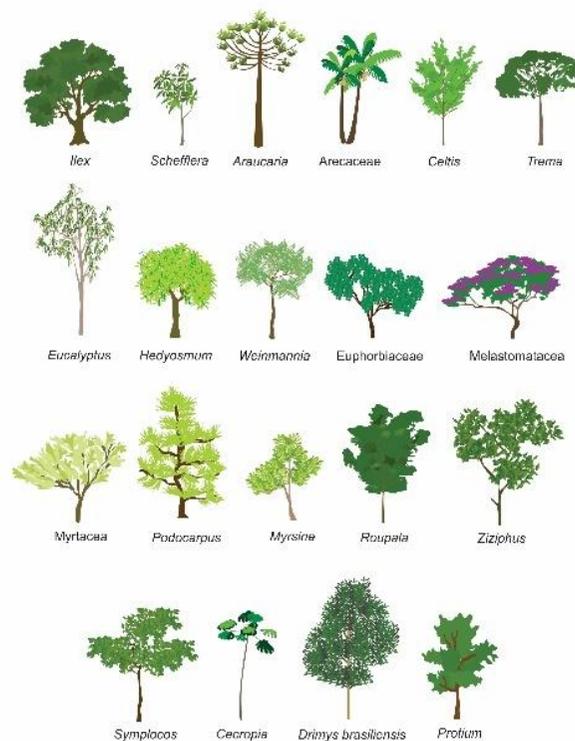


343 anos cal AP  
Zona 4

**ELEMENTOS NÃO ARBÓREOS**  
(Lianas, Ervas, Sub/Arbustos e Plantas Aquáticas)



**ELEMENTOS ARBÓREOS**



Fonte: Autor (2025).

## 7 CONCLUSÃO

A análise *multiproxy* — envolvendo grãos de pólen, esporos, algas e partículas de carvão vegetal — possibilitou a reconstrução da história paleoambiental da Lagoa dos Coutos, localizada na Serra do Gandarela (MG). A investigação revelou que as dinâmicas da vegetação e o regime de fogos foram fortemente influenciados por oscilações climáticas em escalas milenares e centenárias, relacionadas principalmente ao Sistema de Monções de Verão da América do Sul (SMAS).

Com base na interpretação dos dados, foi possível propor um cenário paleoecológico para a região. Durante o Pleistoceno Superior, predominavam extensas formações florestais da Mata Atlântica, acompanhadas por matas ciliares e de galeria associadas a zonas úmidas. A paisagem também incluía campos rupestres e áreas abertas, ocupadas por vegetação savânica. No final desse período, observa-se a retração das florestas e o avanço de vegetação herbácea e gramíneas.

Na transição Pleistoceno-Holoceno, as florestas retomaram sua dominância, enquanto a vegetação savânica passou a ocorrer de forma mais restrita, compondo mosaicos ecológicos. Durante o Holoceno e nos tempos recentes, evidencia-se uma acentuada diversidade fitofisionômica, marcada pela abertura de florestas tropicais semidecíduais e montanas (representativas da Mata Atlântica contemporânea), pela presença de campos rupestres e matas de galeria, além de distintas fisionomias do Cerrado.

As mudanças observadas na vegetação refletem, sobretudo, as variações climáticas associadas aos ciclos glaciais e interglaciais do Quaternário, que influenciaram a distribuição das chuvas e alteraram a duração e a intensidade dos períodos úmidos e secos. Em escala regional, a frequência dos incêndios — de origem natural ou antrópica — também exerceu influência sobre a dinâmica dos ecossistemas, especialmente nas formações savânicas abertas. Nesse contexto, o fogo se destaca como um agente ecológico relevante, cuja recorrência está relacionada tanto à sazonalidade climática quanto, mais recentemente, ao impacto das atividades humanas.

Em síntese, o registro sedimentar da Lagoa dos Coutos permite identificar quatro fases paleoambientais:

1. 70.476 – 52.195 anos cal AP: Predominância de florestas semidecíduais e montanas, campos rupestres e vegetação savânica. O clima era mais frio, com umidade relativamente estável e alta sazonalidade nas chuvas. O regime de fogo era intenso, favorecido pela vegetação aberta e pelo clima estacional;
2. 51.680 – 23.272 anos cal AP: A alternância entre fases glaciais e interglaciais impactou o ciclo hidrológico e reduziu a cobertura florestal densa, promovendo o avanço de gramíneas e herbáceas. Nesse período, os incêndios tornaram-se menos frequentes, possivelmente em função de maior estabilidade climática;
3. 22.589 – 11.982 anos cal AP: Transformações climáticas marcantes, com fases frias seguidas por aumento gradual da umidade, favoreceram o retorno das florestas semidecíduais e montanas, com presença de táxons tropicais. A redução nas queimadas reflete um ambiente mais úmido e a retração das formações savânicas;
4. 11.045 anos cal AP – presente: Fase caracterizada por alternância entre períodos úmidos e secos, com tendência a um clima úmido/subúmido e maior sazonalidade, semelhante às condições atuais. Observa-se a abertura de florestas tropicais semidecíduais e montanas, a expansão da vegetação herbácea e das gramíneas e o aumento da frequência de queimadas, intensificadas por ações antrópicas, como o desmatamento e o uso do fogo no manejo da paisagem.

Os dados provenientes da Lagoa dos Coutos constituem um importante registro das interações entre clima, vegetação e fogo em um ecótono sensível entre os domínios da Mata Atlântica e do Cerrado. Apesar das limitações impostas pela resolução temporal da análise polínica, os resultados desta pesquisa contribuem significativamente para a compreensão da resiliência e vulnerabilidade dos ecossistemas brasileiros frente às mudanças climáticas do passado. Essas informações são fundamentais para subsidiar estratégias de conservação ambiental em regiões de elevada diversidade biológica e crescente pressão antrópica, como a Serra do Gandarela (MG).

## REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul, por ocasião dos períodos glaciais quaternários. **Revista Paleoclimas**, v. 3, p. 1-20, 1977.
- AB'SABER, A. N. **Ecosistemas do Brasil**. São Paulo: Ed. Metalivros. 2006. 300p.
- AB'SABER, A. N. **Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial. 2003. 144p.
- ABRÀMOFF, M. D., MAGALHÃES, P. J., RAM, S. J. Image processing with ImageJ. **Biophotonics Int**, v. 11, p. 36–41, 2004.
- ABREU, M. L. Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 6, p. 17-22, 1998.
- ABSY, M. L. Pólen e esporos do Quaternário de Santos (Brasil), **Hoehnea**, v. 5, p. 1-26, 1975.
- ABSY, M. L., SERVANT, M. A história do clima e da vegetação pelo estudo do pólen. **Ciência Hoje**, v. 16, p. 26-30, 1993.
- AGUIAR, L. M. S.; CAMARGO, A. J. A. **Cerrado: Ecologia e Caracterização**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 2004. 254p. ISBN 85-73832-61-4.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, p. 29-58, 1998.
- ALLISON, T. D.; MOELLER R. E.; DAVIS M. B. Pollen in laminated sediments provides evidence for a mid-Holocene Forest pathogen outbreak. **Ecology**, v. 67, p. 1101-1105. 1986.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.
- ASSIS, A. C.; COELHO, R. M.; *et al.* Water availability de termines physiognomic gradient in an area of low-fertility soils under Cerrado vegetation. **Plant Ecology**, v. 212, p. 1135-1147, 2010.

- BARBERI, M. **Mudanças paleoambientais na região dos cerrados do Planalto Central durante o Quaternário tardio: o estudo da Lagoa Bonita, DF.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- BAUERMANN, S. G.; MARQUES-TOIGO, M.; NEVES, P. C. P. Aspectos tafonômicos em palínologia do Quaternário. Pesquisas: **Botânica**, v. 52, p. 223-239, 2002.
- BEHLING, H. A high-resolution Holocene pollen record from Lago do Pires, SE Brazil: vegetation, climate and fire history. **Journal of Paleolimnology**, v. 14, p. 253-268, 1995.
- BEHLING, H.; LITCHE, M. Evidence of dry and cold climatic conditions at glacial times in tropical southeastern Brazil. **Quaternary Research**, v. 48, p. 348-358, 1997.
- BERG, C. C. Brief Communication, Abscission of anthers in *Cecropia* Loeffl. Acta Bot. Neerl. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 26, p. 411-419, 1977.
- BERNAL, J. P.; CRUZ, F. W.; STRÍKIS, N. M., WANG, X.; DEININGER, M.; CATUNDA, M. C. A.; ORTEGA-OBREGON, C.; CHENG, H.; EDWARDS, R. L.; AULER, A. S. High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cave, Brazil. **Earth Planet. Sci. Lett.** v. 450, p. 186–196, 2016.
- BLAAUW, M.; CHRISTEN, J. A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. **Bayesian Analysis**, v 6, p. 457–474, 2011.
- BOWMAN, D. M. J. S.; *et al.* Fire in the Earth system, **Science**, v. 324, n. 5926, p. 481-484, 2009.
- BRADLEY, R. S. Paleoclimatology: Reconstructing Climates of Quaternary. In: BRADLEY, R. S. (eds.). **Pollen Analysis**, San Diego: Elsevier, 1999. p. 357-396.
- BROECKER, W. S.; DENTON, G. H.; EDWARDS, R. L.; *et al.* Putting the Younger Dryas cold event into context. **Quaternary Science Reviews**, v. 29, p. 1078-1081, 2010.
- BUSH, M. B. On the interpretation of fossil Poaceae pollen in the lowland humid neotropics. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 177, p. 5–17, 2002.
- BUSH, M. B.; WENG, M. B. Introducing a new (freeware) tool for palynology. **Journal of Biogeography**, v. 34, p. 377-380, 2006.
- CARMO, F. F. **Importância Ambiental e Estado de Conservação dos Ecossistemas de Cangas no Quadrilátero Ferrífero e Proposta de Áreas-Alvo**

- para a Investigação e Proteção da Biodiversidade em Minas Gerais.** 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- CASSINO, R. F.; MARTINHO, C. T.; CAMINHA, S. Diversidade de grãos de pólen das principais fitofisionomias do cerrado e implicações paleoambientais. **Gaea**, v. 9, p. 4-29, 2016.
- CASSINO, R. F.; MEYER, K. E. Morfologia de grãos de pólen e esporos de níveis holocênicos de uma vereda do Chapadão dos Gerais (Buritizeiro, Minas Gerais), Brasil. **Gaea**, v. 7, p. 41-70. 2011.
- CASSINO, R. F.; OLIVEIRA, D. A.; SABINO, S. M. L.; CAIXETA, M. L.; GOMES, M.; SANT'ANNA, E. M.; AUGUSTIN, C. H. R. Millennial-scale variability of water supply, vegetation and fire activity on a tropical wetland in central Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 619, 2023.
- CHEMALE, J. R.; F., ROSIÉRE, C. A.; ENDO, I. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um Modelo. **Pesquisa em Geociências**, v. 18, p. 104-127, 1991.
- CLARK, J. S.; PETTERSON, W. A. Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the paleorecord. In: CLARK J. S., CACHIER, H., GOLDAMMER J. G., STOCKS, B. (eds.). **Sediment Records of Biomass Burning and Global Change**. Berlin: Global Environmental Change, 1997. p. 23-48.
- CLARK, R.; ROYALL, P. D. Local and regional sediment charcoal evidence for fire regimes in presettlement North-Eastern North America. **J. Ecol**, v. 84, p. 365-382, 1996.
- COHEN, K. M.; HARPER, D. A. T., GIBBARD, P. L. ICS International Chronostratigraphic Chart 2023/09. International Commission on Stratigraphy, IUGS. 2024.
- COLTRINARI, L. Global Quaternary changes in South America. **Elsevier**, v. 7, p. 11-23, 1993.
- CONEDERA, M.; TINNER, W.; NEFF, C.; MEURER, M.; DICKENS, A. F.; KREBS, P. Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. **Quat. Sci. Rev.**, v. 28, p. 555-576, 2009.
- CÔRREA, I. **Variações Climáticas no Quaternário**. Rio Grande do Sul: LUME. 2021. 103 p.

COSTA JÚNIOR, M. P. **Interações morfo-pedogenéticas nos sedimentos do Grupo Barreiras e nos leques aluviais pleistocênicos no Litoral Norte da Bahia – município de Conde**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2008.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20505>. Acesso em: 10 set. 2024.

CRUZ, F. W.; BURNS, S. J.; KARMANN, I.; SHARP, W. D.; VUILLE, M.; CARDOSO, A. O.; FERRARI, A.; DIAS, P. L. S.; VIANA, O. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. **Nature**, v. 434, p. 63-66, 2005.

DEININGER, M.; WARD, B. M. W.; NOVELLO, V. F.; CRUZ, F. W. Late Quaternary Variations in the South American Monsoon System as Inferred by Speleothems—New Perspectives Using the SISAL. **Quaternary Science Reviews**, v. 2, p. 19-21, 2019.

DIAS, E. S. **A decomposição de macrófitas não é influenciada pela comunidade de invertebrados: um estudo de caso em uma lagoa temporária na Serra do Gandarela (MG)**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

DIAS, L. M. J. **A palinologia ao acesso de todos: estudo comparativo de duas técnicas de análise de sedimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Algarve, Algarve, 2006.

em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 116p.

ENACHE, M. D.; CUMMING, B. F. Tracking recorded fires using charcoal morphology from the sedimentary sequence of Prosser Lake. **Quaternary Res.**, v. 65, p. 282-292, 2006.

ENDO, I.; ROCHA FILHO, O. G. Estratigrafia, arcabouço estrutural e controle da mineralização ferrífera da mina de Gongo Soco, MG. Relatório Interno. 2003. 48p.

FERNANDES, A. S. Contribuições sobre a climatologia do Parque Nacional da Serra do Gandarela, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 33, p. 513-533, 2023.

FERNANDES, A. S.; MOREIRA, A. A. M. A pluviometria do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 753-775, dez. 2022.

FOLLADOR, G. **Paleoflora e Palinologia da Paleolagoa Seca (Catalão, GO, Brasil) e Implicações para a Paleoecologia da Região Meridional do Cerrado**. Tese

- (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 166 p. 2022.
- FOUCAULT, A. **O clima: história e devir do meio terrestre**. Lisboa: Perspectivas Ecológicas, 1996. 303p.
- GALANTER, M.; *et al.* Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NOX, and O3, **J. Geophys. Res.**, v. 105, p. 6633–6653, 2000.
- GOOGLE EARTH. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 10 set. 2024.
- GOSLING, William D.; RACZKA, M. F.; MAEZUMI, S. Yoshi; *et al.* Scarce fire activity in north and north-western Amazonian forests during the last 10,000 years. **Plant Ecology & Diversity**, v. 14, p. 143-156, 2021.
- HAWTHORNE D.; MUSTAPHI C. J. C.; ALEMAN J. C; *et al.* Global Modern Charcoal Datas *et* (GMCD): A tool for exploring proxy-fire linkages and spatial patterns of biomass burning. **Quaternary International**, v. 488, p. 3-17. 2018.
- HEAD, M. J. 2019. Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Present status and future directions. **Quaternary International**, v. 500, p. 32-51.
- HEINE, K. Late Quaternary Climatic changes of the Southern Hemisphere. **Geol. Paleont.**, v., p. 1751-1768, 1984.
- HIPPERTT, J.; DAVIS, B. Dome emplacement and formation of kilometer-scale synclines in a granite-greenstone terrain (Quadrilátero Ferrífero, southeastern Brazil). **Precambrian Research**, v. 102, p. 99–121, 2000.
- HÓRAK-TERRA, I.; *et al.* Holocene climate change in central–eastern Brazil reconstructed using pollen and geochemical records of Pau de Fruta mire (Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 437, p. 117-131, 2015.
- HUECK, K. Die Ursprünglichkeit der brasilianischen “Campos cerrados” und neue Beobachtungen an ihrer Südgrenze. **Erdkunde**, v. 11, p. 193–203, 1956.
- IBGE. 2004. Mapa de Biomas do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/mapas>.
- IBGE. 2012. Mapa de Biomas do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/mapas>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: 10 set. 2024.

IDE - Sisema. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>

. Acesso em: 10 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Mapa de Clima do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Não paginado. Escala 1:5.000.000. Base digital, arquivo em shapefile.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). Proposta de criação do Parque Nacional da Serra do Gandarela. Estudos técnicos para a criação de Unidade de Conservação Federal. 2022. 103p.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). Plano de Manejo Integrado do Parque Nacional (PMIF) da Serra do Gandarela - MG. 2010. 41p.

INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES (IUGS). Homepage. Disponível em: <https://www.iugs.org/>. Acesso em: 10 set. 2024.

JARDIM, C. H.; GALVANI, E. Unidades topoclimáticas no Parque Nacional da Serra do Cipó. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.30, p.219-245, 2022.

JARDIM, C. H.; MOURA, F. P. Variações dos totais de chuvas e temperatura do ar na bacia do rio Pandeiros, norte do estado de Minas Gerais-Brasil: articulação com fatores de diferentes níveis escalares em área de transição climática de cerrado para semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dossiê Climatologia de Minas Gerais, 2018.

JONES, M. B.; MUTHURI, F. M. Standing biomass and carbon distribution in a papyrus (*Cyperus papyrus* L.) swamp on Lake Naivasha, Kenya. **J. Trop. Ecol**, v. 13, n. 3, p. 347-356, 1997.

JUGGINS, S. C2: Software for ecological and palaeoecological, data analysis and visualisation. User guide. Newcastle University, Newcastle, UK, 2007. 73p.

JÚNIOR, G. F. **A história ambiental dos Eucaliptos: Austrália, Brasil e Vale do Paraíba Paulista**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, São Paulo, 151 p. 2011.

KALAND, P. E.; KNUT, K.; STABELL, B. Radiocarbon-dating of transitions between marine and lacustrine sediments and their relation to the development of lakes. **Boreas**, v. 13, p. 243-258, 1984.

- KAPP, R. O.; DAVIS, O. K.; KING, J. E. (eds.). Pollen and spores. **American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation Publication**. 2000. 279p.
- KAUFFMANN, M. **Fragmentos de carvão (charcoal) como indicativo da ocorrência de incêndios vegetacionais durante o Quaternário do Planalto das Araucárias, Rio Grande do Sul, Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário UNIVATES, Rio Grande do Sul, 2009.
- LAMOUNIER, W. L.; CARVALHO, V. L. M.; SALGADO, A. A. R. Serra do Gandarela: possibilidade de ampliação das unidades de conservação no Quadrilátero Ferrífero-MG. **Revista Do Departamento de Geografia**, v. 22, p. 171–192, 2011.
- LAVOREL, S.; *et al.* Vulnerability of land systems to fire: interactions among humans, climate, the atmosphere, and ecosystems. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12, n. 1, p. 33–53, 2000.
- LEDRU, M. P.; BRAGA, P.; SOUBIE, I. The last 50,000 years in the Neotropics (Southern Brazil): evolution of vegetation and climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 123, p. 239-357, 1996.
- LEIBOWITZ, Z. W. **Diatoms as proxies for environmental change: a paleolimnological investigation of a shallow iron outcrop lake (Lagoa dos Coutos, Serra do Gandarela, MG)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- LORENTE, F. L.; JUNIOR, A. A. B.; OLIVEIRA, P. E.; PESSEDA, L. C. R.; Atlas Palinológico. São Paulo: FEALQ. 2017. 333p.
- LORENZI, H. Árvores Brasileiras. **PLANTARUM**, Nova Odessa, 1992. 352p.
- LÜTHI, D.; LE FLOCH, M.; BEREITER, B.; BLUNIER, T.; BARNOLA, J.; SIEGENTHALER, U.; RAYNAUD, D.; JOUZEL, J.; FISCHER, H.; KAWAMURA, K.; STOCKER, T. F. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. **Nature**, v. 413, p. 379-382, 2008.
- MAHER, B. A.; THOMPSON, R. (eds.). Quaternary climates, environments and magnetism. Cambridge: **Cambridge University Press**, 1999. 402p.
- MAPBIOMAS. Map Biomas Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 10 set. 2024.
- MCLAUCHLAN, K. K.; HIGUERA, P. H.; MIESEL, J. Fire as a fundamental ecological process: research advances and frontiers. **Journal of Ecology**, v. 108, n. 5, p. 2047–2069, 2020.

- MEmondonçALO, M. M. **A confluência entre a ecologia do fogo e o conhecimento Xavante sobre o manejo do fogo no cerrado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 127p. 2007.
- MENDES, J. C. **Conheça a Pré-História brasileira**. São Paulo: EDUSP. 1970. 172 p.
- MENDONÇA, F. Aquecimento global e saúde: uma perspectiva geográfica – notas introdutórias. **Revista Terra Livre**, v. 1, n. 20, p. 205–221, 2003.
- MENDONÇA, R. C., FELFILI, J. M., WALTER, B., SILVA Jr., M., REZENDE, A., FILGUEIRAS, T. S., NOGUEIRA, P. E., FAGG, C. Flora vascular do bioma Cerrado: Checklist com 12.356 espécies. **Emprapa**, v. 2, p. 421–1279, 2008.
- MIRANDA, H. S. (ed.). **Efeitos do regime de fogo sobre a estrutura de comunidades de Cerrado: Projeto Fogo**. IBAMA, MMA, Brasília, 2010.
- MOORE, A. M.; HILLMAN, G. C. The Pleistocene to Holocene transition and human economy in Southwest Asia: the impact of the Younger Dryas. **American Antiquity**, v. 57, p. 482–494, 1991.
- MUSTAPHI, C. J. C.; PISARIC, M. F. J. A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 38, p. 734-754, 2014.
- OCHES, E. A. **Earth system: history and natural variability, Quaternary history**. 2. ed. Oxford: EOLSS Publishers, 2009. 426 p.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in south-eastern Brazil, and the influence of climate. **Biotropica**, v. 32, p. 793–810, 2000.
- OVERPECK, J. T.; WEBB, R. S.; WEBB, T. Mapping eastern North American vegetation change of the past 18ka: no-analogs and the future. **Geology**, v. 20, p. 1071–1074, 1992.
- PARRENIN, F. *et al.* Synchronous change of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature during the last deglacial warming. **Science**, v. 339, p. 1060–1063, 2013.
- PISARIC, M. F. J. Long distance transport of terrestrial plant material by convection resulting from forest fires. **Journal of Paleolimnology**, v. 28, n. 3, p. 349–354, 2002.
- PIVELLO, V. R. The use of fire in the cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, v. 7, p. 24–39, 2011.

- RACZKA, M. F.; DE OLIVEIRA, P. E.; BUSH, M.; MCMICHAEL, C. M.; Two paleoecological histories spanning the period of human settlement in southeastern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v. 28, p. 144-151, 2013.
- RIBEIRO, J.; WALTER, B.; As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. 1 ed, Embrapa Cerrados, 2008. p. 151-212.
- RODRÍGUEZ-ZORRO, P. A.; LEDRU, M. P.; FAVIER, C.; BARD, E.; *et al.* Alternate Atlantic forest and climate phases during the early Pleistocene 41 kyr cycles in southeastern Brazil. **Quaternary**, v. 282, p. 1-15, 2022.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. **Contribuição à palinologia dos cerrados**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1973. 219p.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. **Critérios e técnicas para o Quaternário**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007. 440p.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. **História ecológica da Terra**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1994. 307p.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. Palinologia: fundamentos, técnicas e algumas perspectivas. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 23, n. 4, p. 695–717, 1961.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. Reconstrucion de los ambientes a través de los granos de polen. **Investigación y Ciencia**, v. 3, p. 6–17, 1984.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. Reconstruindo as comunidades vegetais e o clima no passado. **Humanidades**, v. 48, p. 24–40, 2001.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L.; RULL, V. A method of introducing exotic pollen for palaeoecological analysis of sediments. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 47, p. 97–103, 1986.
- SCHÄBITZ, F. Holocene climatic variations in northern Patagonia, Argentina. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 109, p. 287-294, 1994.
- SCHEEL-YBERT, R. Considerações sobre o método de datação pelo carbono-14 e alguns comentários sobre a datação de sambaquis. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, v. 9, p. 297–301, 1999.
- SCHMITZ, P. I. Caçadores e coletores antigos da região do cerrado. In: PINTO, M. N. (eds.). **Cerrado**. Brasília, Editora da Universidade de Brasília, 1994. p. 109–188.
- SEPPÄ, H. Pollen analysis, principles. In: SCOTT, A. E.; CARY, J. M. (eds.). **Encyclopedia of Quaternary Science**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2013. p. 794–804.

- SILVA, E. E. C. **O que uma lagoa pode nos contar sobre mudanças ambientais? Uma reconstrução do passado utilizando subfósseis de cladocera.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- SILVA, J. R.; SALGADO, A. A. R. Mapeamento das unidades de relevo da região da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Geografias**, v. 5, n. 2, p. 107–125, 2009.
- SILVEIRA, F. A. O.; NEGREIROS, D.; BARBOSA, N. P. U.; BUISSON, E.; CARMO, F. F.; CARSTENSEN, D. W.; CONCEIÇÃO, A. A.; CORNELISSEN, T. G.; ECHTERNACHT, L.; FERNANDES, G. W.; GARCIA, Q. S.; GUERRA, T. J.; JACOBI, C. M.; LEMOS-FILHO, J. P.; LE STRADIC, S.; MORELLATO, L. P. C.; NEVES, F. S.; OLIVEIRA, R. S.; SCHAEFER, C. E.; *et al.* Ecology and evolution of plant diversity in the endangered *campo rupestre*: a neglected conservation priority. **Plant and Soil**, v. 403, p. 129–152, 2016.
- SOUZA, M. M. **Análise paleoambiental Quaternária do écotono Cerrado/Mata Atlântica no município de Mogi Guaçu, SP.** Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 234 p., 2014.
- SOUZA, S. R.; OLIVEIRA, A. O.; HARTMANN, C. Utilização do testemunhador Russian Peat Borer no Saco do Martins e Arraial, Estuário da Laguna dos Patos: RS, Brasil. **Gravel**, v. 6, p. 1–13, 2008.
- STOCKMAR, J. Tablets spores used in absolute pollen analysis. **Pollen et Spores**, v. 13, p. 615-621, 1971.
- STRÍKIS, N. M.; CHIESSI, C. M.; CRUZ, F. W.; VUILLE, M.; CHENG, H.; BARRETO, E. A. S.; MOLLENHAUER, G.; KASTEN, S.; KARMANN, I.; EDWARDS, R. L.; BERNAL, J. P.; SALES, H. R. Timing and structure of Mega-SACZ events during Heinrich Stadial 1. **Geophysical Research Letters**, v. 42, p. 5477-5484, 2015.
- STRÍKIS, N. M.; CRUZ, F. W.; CHENG, H.; KARMANN, I.; EDWARDS, R. L.; VUILLE, M.; WANG, X.; DE PAULA, M. S.; NOVELLO, V. F.; AULER, A. S. Abrupt variations in South American monsoon rainfall during the Holocene based on a speleothem record from central-eastern Brazil. **Geology**, v. 39, p. 1075–1078, 2011.
- TEIXEIRA, W. **A evolução geotectônica da porção meridional do Cráton São Francisco, com base em interpretações geocronológicas.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 224 p. 1985.

TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Disponível em: [http://www.dsr.inpe.br/topodata/#:~:text=O%20projeto%20Topodata%20oferece%20o%20Modelo%20Digital%20de%20Eleva%C3%A7%C3%A3o%20\(MDE\)](http://www.dsr.inpe.br/topodata/#:~:text=O%20projeto%20Topodata%20oferece%20o%20Modelo%20Digital%20de%20Eleva%C3%A7%C3%A3o%20(MDE).). Acesso em: 10 set. 2024.

TRAVERSE, A. Spores/pollen morphology. In: TRAVERSE, A. **Paleopalynology**. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2007. p. 95–95.

UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. **Ecology**, v. 71, n. 2, p. 437–449, 1990.

VACHULA, R. S.; SAE-LIM, J.; RECHENG, L. A critical appraisal of charcoal morphometry as a paleofire fuel type proxy. **Quaternary Science Reviews**, v. 262, 2021.

VAN DER HAMMEN, T. Paleoeecology of the Neotropics: an overview of the state of affairs. **Boletim IG-USP, Publicação Especial**, v. 8, p. 35-56, 1991.

VAN DER WERF, G. R.; *et al.* Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. **Science**, v. 303, p. 73–76, 2004.

VAUGHAN, A.; NICHOLS, G. Controls on the deposition of charcoal: implications for sedimentary accumulations of fusain. *Journal of Sedimentary Research*, v. 65, p. 129–135, 1995.

VIANA, C. B. O. **Reconstituição da paleovegetação da região da Lagoa dos Coutos, Barão dos Cocais – MG na primeira metade do Holoceno**. Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

WANNER, H., MERCOLLI, L., GROSJEAN, M., RITZ, S. P. Holocene climate variability and change; a data-based review. **Journal of the Geological Society**, v. 172, p. 254–263, 2014.

WARD, D. Combustion chemistry and smoke. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (eds.). **Forest Fires: Behavior and Ecological Effects**. San Diego: Academic Press, 2001. p. 55–77.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, v. 30, p. 377–392, 1922.

WERNECK, F. P.; NOGUEIRA, C.; COLLI, G.R. *et al.* Climatic stability in the Brazilian Cerrado: implications for biogeographical connections of South American savannas, species richness and conservation in a biodiversity hotspot. **Journal of Biogeography**, v. 39, p. 1695–1706, 2012.

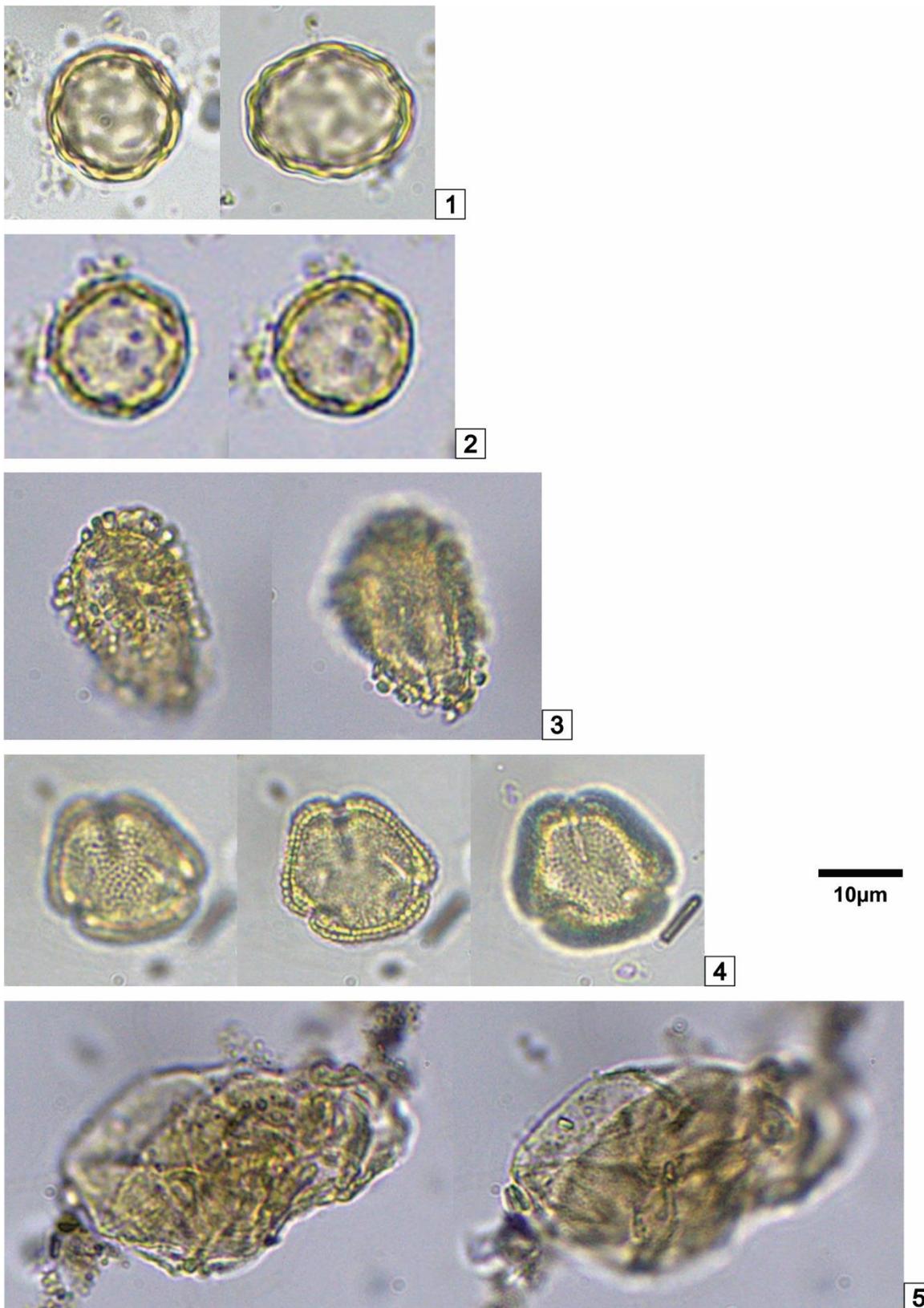
WHITLOCK, C.; LARSEN, C. Charcoal as a fire proxy. In: SMOL, J. P.; BIRKS, H. J.; LAST, W. M. (eds.). **Tracking environmental change using lake sediments: terrestrial, algal, and siliceous indicators**. 3 ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. p. 75–95.

WILLIAMS, G. L.; LENTIN, J. K.; FENSOME, R. A. The Lentin and Williams Index of fossil dinoflagellates. Texas: American Association of Stratigraphic Palynologists, **Contributions Series**, 1998. 817p.

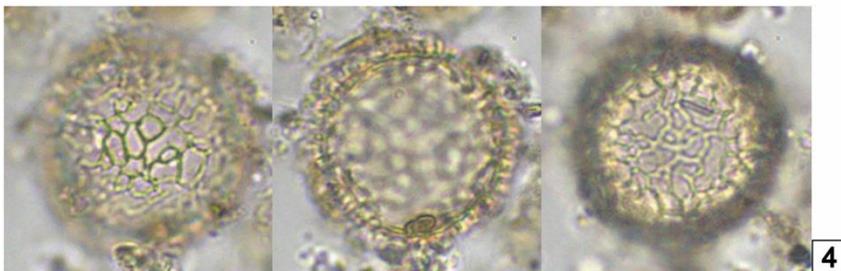
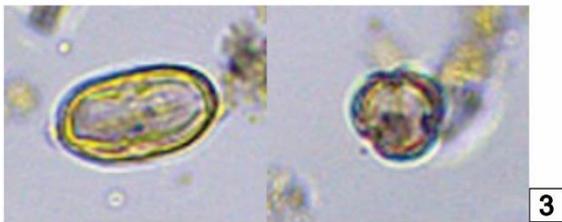
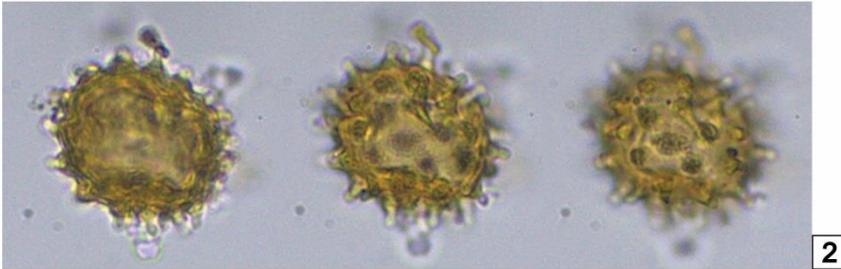
WILLIS, K. J.; BAILEY, R. M.; BHAGWAT, S. A.; BIRKS, H. J. B. Biodiversity baselines, thresholds and resilience: testing predictions and assumptions using palaeoecological data. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 25, n. 10, p. 583–591, 2010.

WORLDCLIM. Disponível em: <https://worldclim.org/>. Acesso em: 10 set. 2024.

## APÊNDICES



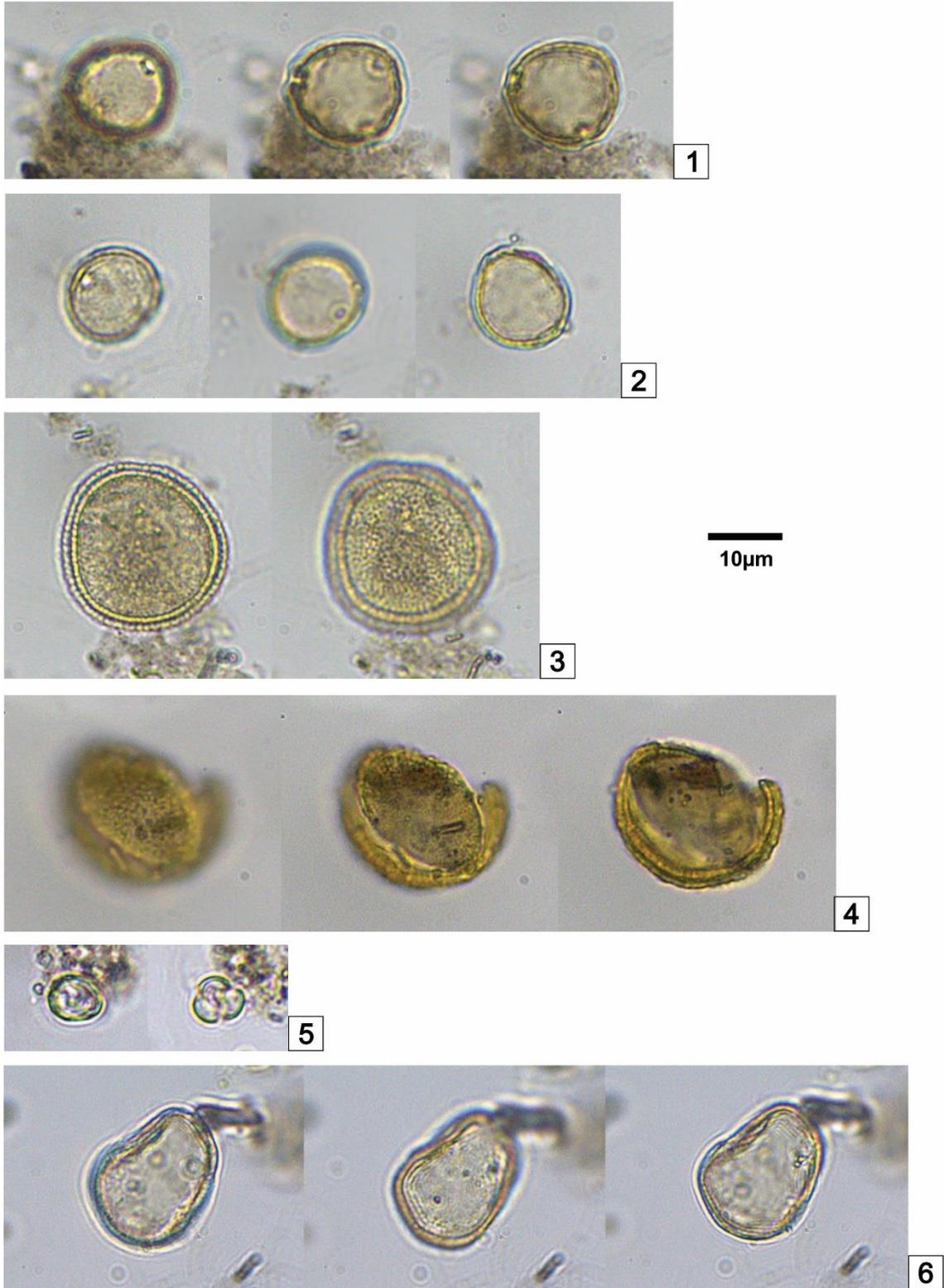
Prancha 1 – **Alismataceae**: *Echinodorus* (1). **Amaranthaceae** (2). **Aquifoliaceae**: *Ilex* (3).  
**Araliaceae**: *Schefflera* (4). **Araucariaceae**: *Araucaria* (5).



10µm



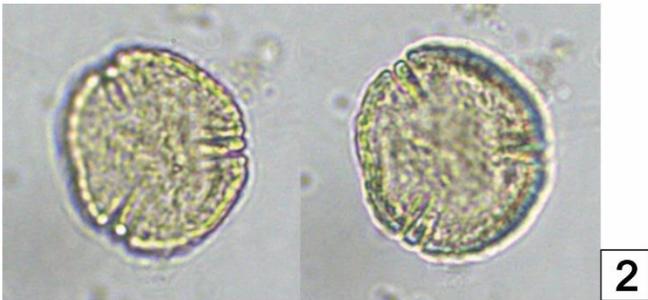
Prancha 2 – **Arcaceae** (1). **Asteraceae** (2). **Begoniaceae** (3). **Bignoniaceae**: Tipo *Amphilophium* (4). **Burseraceae**; *Protium* (5).



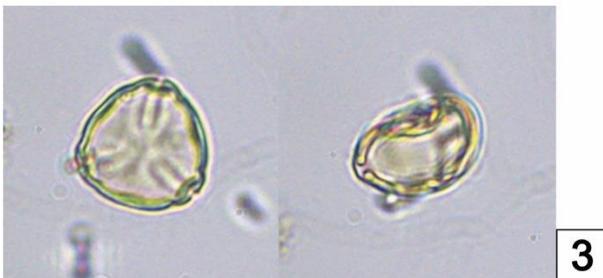
Prancha 3 – **Cannabaceae**: *Celtis* (1); *Trema* (2). **Chloranthaceae**: *Hedyosmum* (3).  
**Convolvulaceae** (4). **Cunoniaceae**: *Weinmannia* (5). **Cyperaceae** (6).



1



2



3

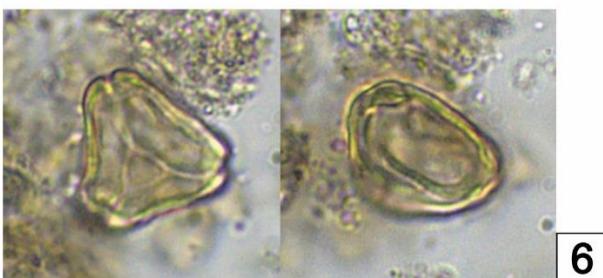


4



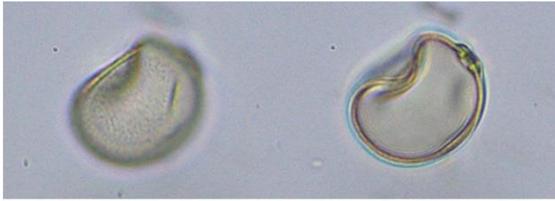
5

10µm



6

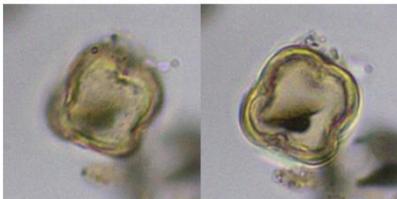
Prancha 4 – **Euphorbiaceae**: *Alchornea* (1); *Aparisthium* (2). **Lythraceae**: *Cuphea* (3).  
**Melastomataceae** (4). **Myrtaceae** (5). **Myrtaceae**: *Eucalyptus* (6).



1



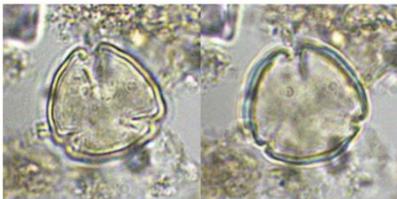
2



3

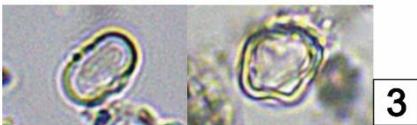
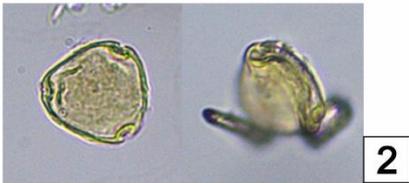


4

  
10µm


5

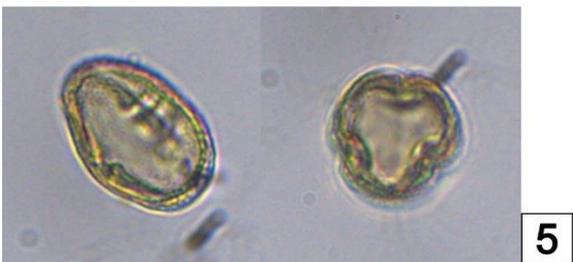
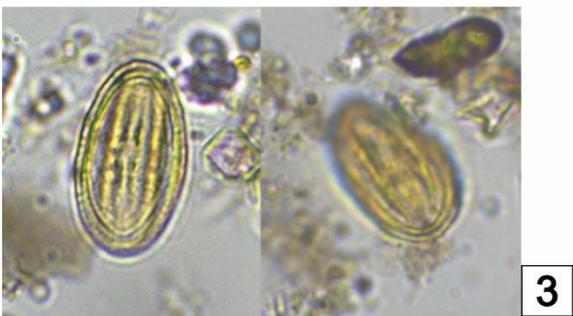
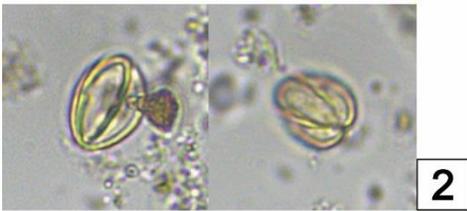
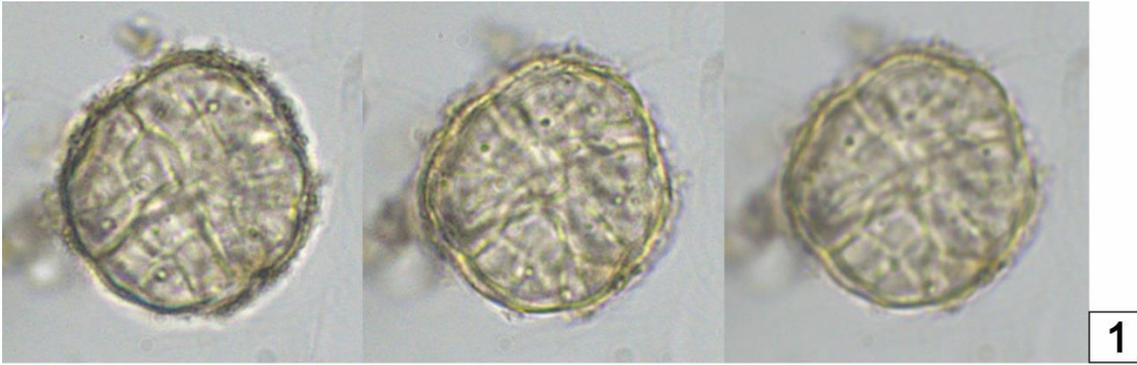
Prancha 7 – Poaceae (1). Podocarpaceae: *Podocarpus* (2). Primulaceae: *Myrsine* (3). Proteaceae: *Roupala* (4). Rhamnaceae: Tipo *Ziziphus* (5).



10µm

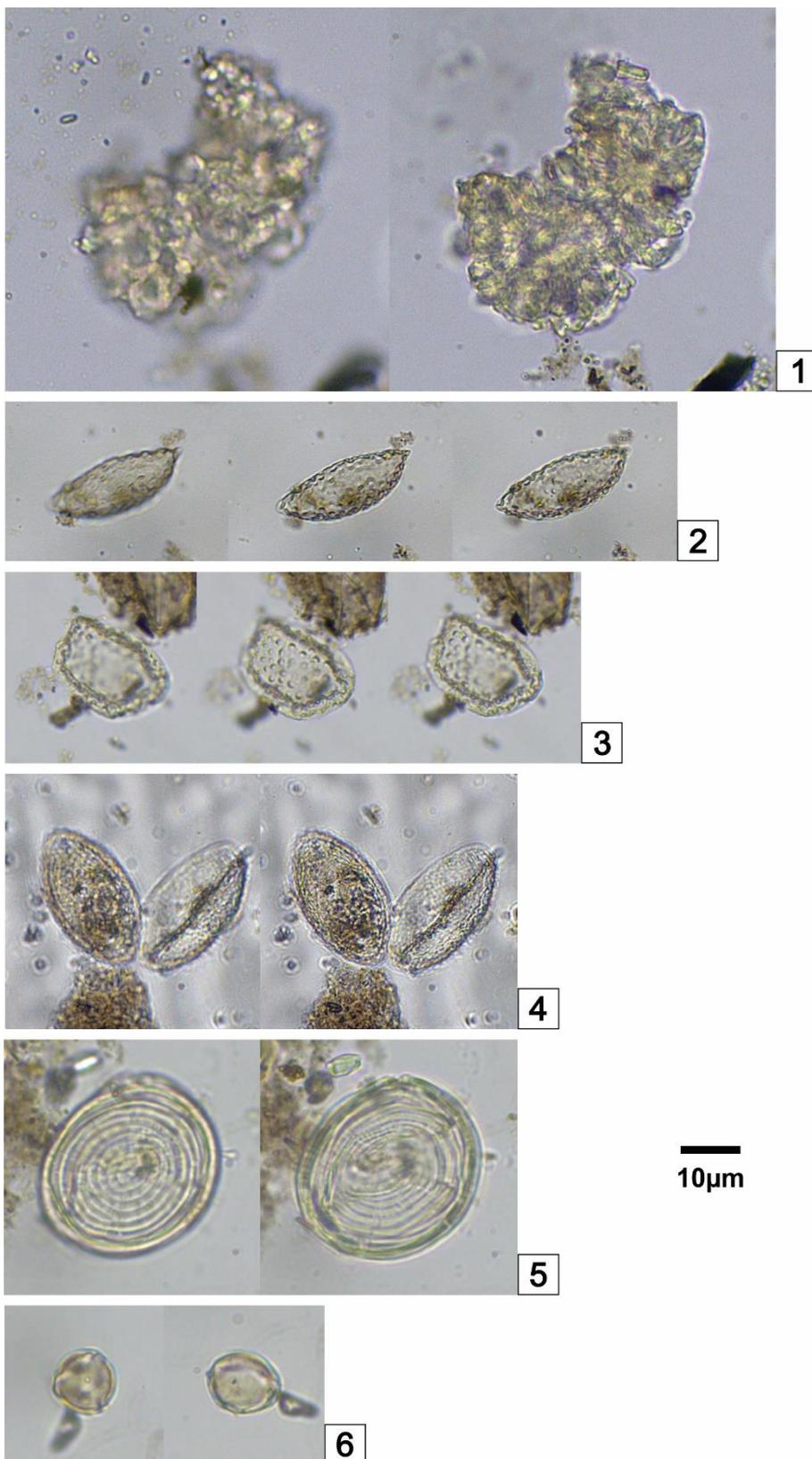


Prancha 8 – **Rubiaceae:** *Borreria* (1). **Symplocaceae:** *Symplocos* (2). **Urticaceae:** *Cecropia* (3).  
**Winteraceae:** *Drimys brasiliensis* (4).

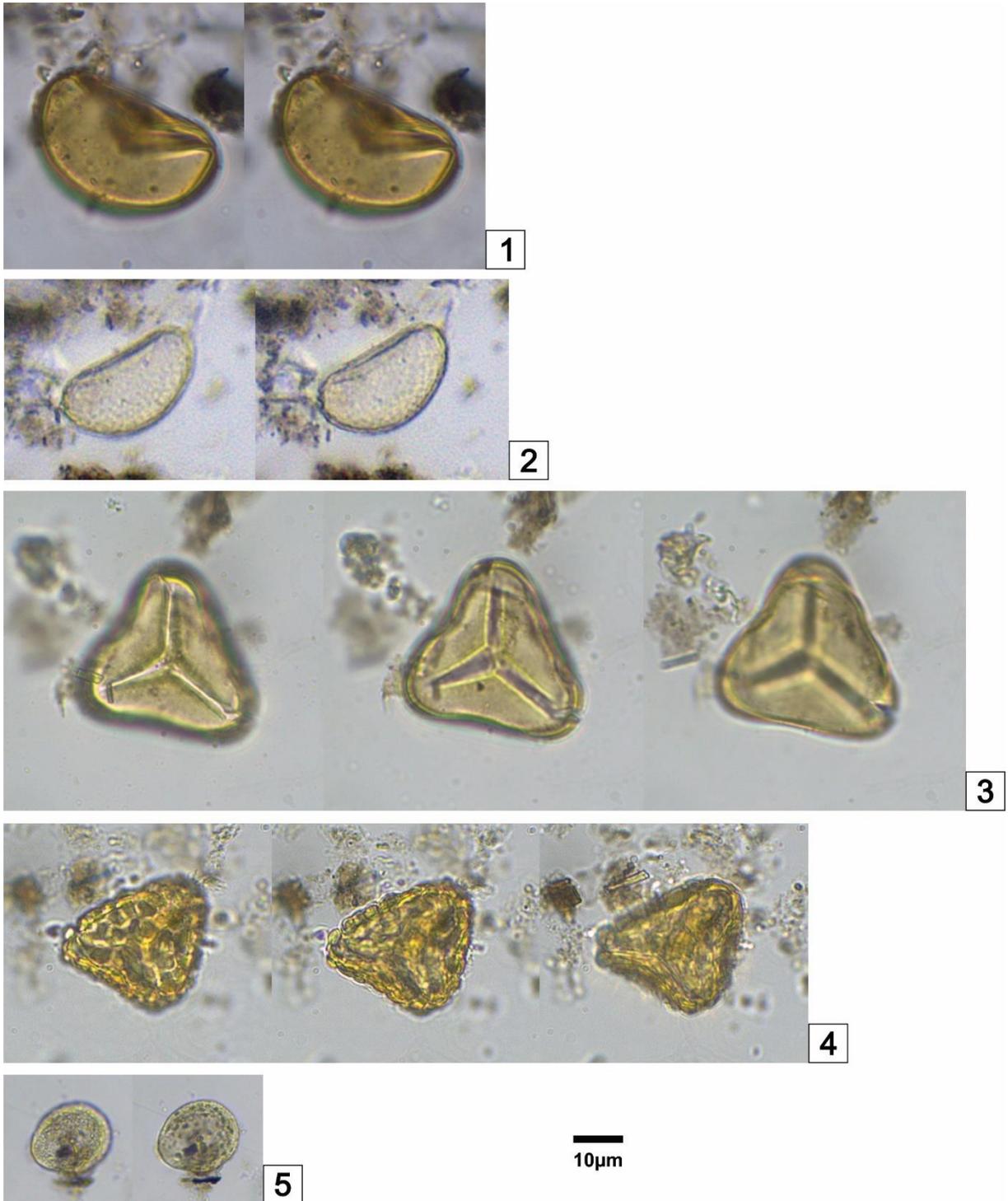


10µm

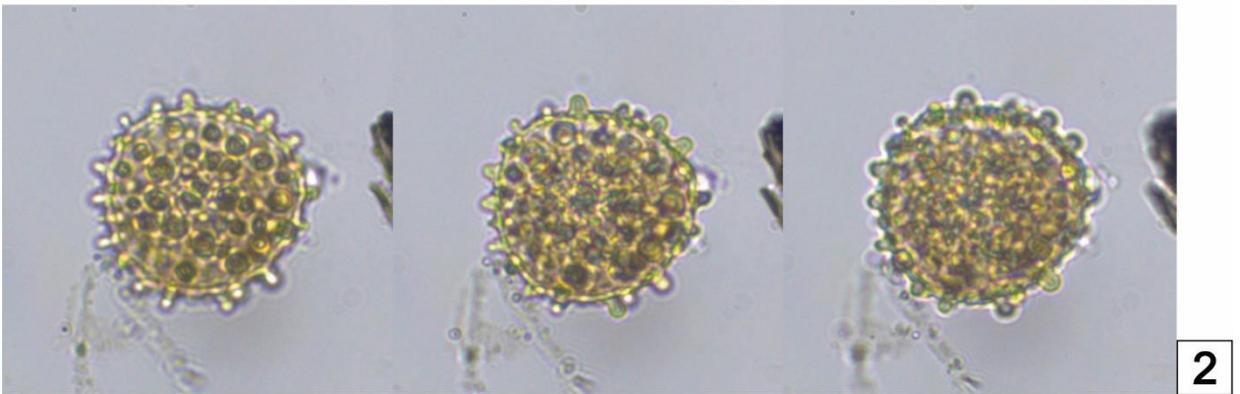
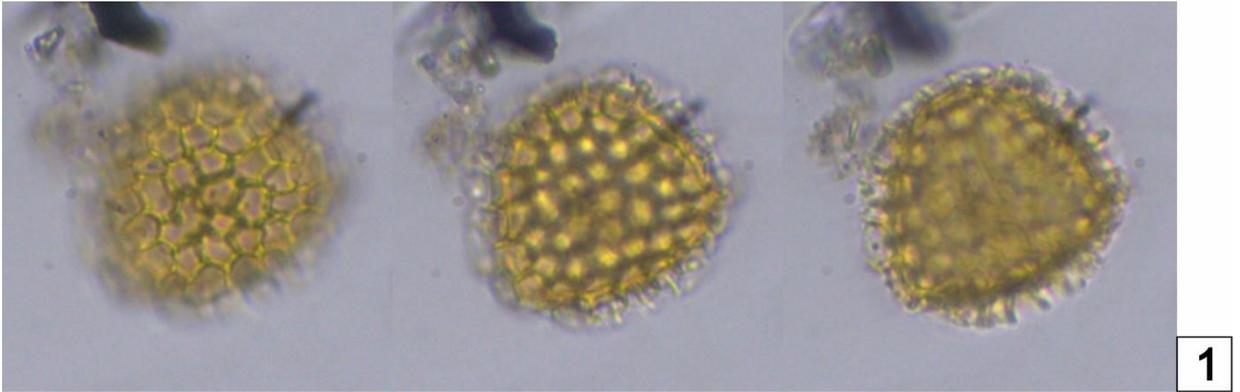
Prancha 9 – Grãos de pólen não identificados: (1); (2); (3); (4); (5); (6).



Prancha 10 – Esporos de algas. **Botryococcaceae:** *Botryococcus* (1). **Zygnemataceae:** *Zygnema* (2); *Debarya* (3); *Spyrogira* (4). **Incertae sedis:** *Pseudoschyzaeae* (5). **Chlamydomonadaceae:** *Chlamydomonas* (6).



Prancha 11 – Esporos de Pteridófitas. Blechnaceae: *Blechnum* (1). Polypodiaceae: *Polypodium* (2). Pteridaceae: Tipo *Adiantum* (3). Esporo de Monilófitas. Cyatheaceae: *Cyathea* (4). Esporos de Briófitas. Notothyladaceae: *Phaeoceros* (5).



10µm

Prancha 12 – **Lycopodiaceae**: *Lycopodium clavatum* (1). **Esporos não identificados**: (2); (3).