

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geografia e Análise Ambiental**

Jorge Duarte Rosário

**SEDIMENTOS CLÁSTICOS EM CAVERNAS DA REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA  
SANTA (MG): origem, mecanismos de deposição e estratigrafia**

**Belo Horizonte**

**2021**

Jorge Duarte Rosário

**SEDIMENTOS CLÁSTICOS EM CAVERNAS DA REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA  
SANTA (MG): origem, mecanismos de deposição e estratigrafia**

**Área de concentração: Análise  
Ambiental**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Célio Valadão

Coorientador: Prof. Dr. Luís Beethoven Piló

Belo Horizonte

2021

R789s  
2021

Rosário, Jorge Duarte.

Sedimentos clásticos em cavernas da região cárstica de Lagoa Santa (MG) [manuscrito] : origem, mecanismos de deposição e estratigrafia / Jorge Duarte Rosário. – 2021.

129 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Roberto Célio Valadão.

Coorientador: Luís Beethoven Piló.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2021.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Inclui anexo.

Bibliografia: f. 115-126.

1. Sedimentos (Geologia) – Teses. 2. Grutas – Teses. 3. Carste – Lagoa Santa (MG) – Teses. 4. Transporte de sedimento – Teses. I. Valadão, Roberto Célio. II. Piló, Luís Beethoven. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 551.3.051(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

SEDIMENTOS CLÁSTICOS EM CAVERNAS DA REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA SANTA (MG): ORIGEM,  
MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO E ESTRATIGRAFIA

JORGE DUARTE ROSÁRIO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em GEOGRAFIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOGRAFIA, área de concentração ANÁLISE AMBIENTAL.

Aprovada em 16 de dezembro de 2021, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Rogério Elias Soares Uagoda  
UNB

Prof. Fábio Soares de Oliveira  
UFMG

Prof. Roberto Célio Valadão - Orientador  
UFMG

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por Roberto Celio Valadão, Professor do Magistério Superior, em 16/12/2021, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por Fabio Soares de Oliveira, Professor do Magistério Superior, em 16/12/2021, às 11:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº](#)

[https://sei.ufmg.br/sei/controlador.php?acao=documento\\_imprimir\\_web&acao\\_origem=arvore\\_visualizar&id\\_documento=1200734&infra\\_sistema=100...](https://sei.ufmg.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=1200734&infra_sistema=100...) 1/2



[10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Rogério Elias Soares Uagoda, Usuário Externo, em 03/01/2022, às 14:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 1128705 e o código CRC 195D58FC.

*À minha família, pelos exemplos e suporte  
à minha existência...*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, em especial minha mãe Maria da Glória, pelo dom da vida e pelos ensinamentos passados nessas quase quatro décadas de convivência. Meu pai José Júlio, apesar da pouca coexistência, pelos sólidos e respeitosos valores nos quais sua jornada foi pautada e que hoje reconheço. Agradeço também minhas queridas irmãs Cristiane e Marta! Pelas conversas e incentivos às boas práticas cidadãs. À minha esposa Daniela que desde o início de nossa relação compartilha comigo esse sonho, além de suportar minhas ausências... E minha filha Maria, que me faz ter esperança...

Aos parceiros Leonardo, Fábio, Ataliba, que ao longo dessa breve caminhada por poderem me ouvir, participar, ajudar, criticar e me dar força para prosseguir nos momentos de reflexão.

Aos mestres Prof. Luís Beethoven Piló, o qual devo boa parte de minha formação profissional através das inúmeras oportunidades e um longo convívio. Ao Prof. Roberto Célio Valadão que me acolheu no Programa de Pós-Graduação em Geografia na condição de orientador e que com seu olhar atemporal sobre as coisas me despertou uma visão diferente...

Agradeço também ao André Strauss do MAE (Museu de Arqueologia e Etnologia) da USP, à Cíntia Palhares, do PESU (Parque Estadual do Sumidouro), ao ICMBio/Cecav, ao Fernando do Laboratório de Geomorfologia do IGC, Marcelo Bastos, entre outras...

Às instituições Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Instituto de Geociências – IGC e Programa de Pós-Graduação em Geografia pelo respeito e organização das estruturas física e humana. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro concedido nesses dois anos, fundamental para o desenvolvimento deste projeto.

## Resumo

A organização, análise e discussão sobre os sedimentos encontrados em algumas cavernas da região cárstica de Lagoa Santa foi o objetivo deste projeto, que teve como etapa inicial o levantamento daquelas cavernas que continham sedimentos clásticos investigados e seus dados disponíveis na literatura, em que os primeiros modelos sobre a origem, transporte e deposição foram sugeridos.

De modo geral, os principais autores para o tema na região demonstram que os sedimentos encontrados nas cavernas são oriundos da cobertura metapelítica (siltitos e argilitos) da Formação Serra de Santa Helena que deu origem a cobertura pedológica atual – alóctone. Esse material inconsolidado chega até as cavernas por meio de fissuras e fendas alargadas – material epicárstico, e com a acoplagem entre as aberturas das cavernas com a vertente. Possuem percentuais elevados de  $\text{SiO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e concentrações importantes de  $\text{FeO}_3$ , indicando maior tempo de exposição a condições de lixiviação e concentração de minerais – oxidação e redução. Os sedimentos clásticos autóctones são caracterizados por blocos abatidos de granulometria variada, fragmentos de espeleotemas e o produto residual da rocha, que para os calcários do Membro Lagoa Santa, é incipiente. Quanto aos mecanismos de transporte, prevalecem as corridas de lama ou detritos e suspensão. Estes mecanismos promovem a mistura e seleção do material inconsolidado de acordo com o ambiente de deposição (rede de condutos), que impõem condições distintas a circulação das águas, muitas vezes numa mesma galeria. Quanto à organização dos sedimentos – estratigrafia, apresentam sequências de fácies sedimentares argilosas (muitas vezes cimentadas por calcita), entre o vermelho e o amarelo, com restos fossilíferos da megafauna extinta e da fauna atual, além de fragmentos de calcário, intercalados por níveis calcíticos (pisos estalagmíticos).

Desta maneira, foram selecionadas novas cavernas com depósitos de sedimentos passíveis de análises: Grutas da Escada e Irmãos Piriás. Apreendendo um misto de ambientes de deposição influenciados por processos fluviais/lacustres (Gruta Irmãos Piriás) e vadoso (Gruta da Escada), foram realizadas análises descritivas e laboratoriais das fácies sedimentares levantadas nas duas cavernas para relacionar a origem, mecanismos de transporte e o ambiente de deposição aos quais

foram submetidos. Os modelos de origem, mecanismos de transporte e deposição apresentados por diversos autores para os depósitos em cavernas da região foram corroborados, tanto nos padrões de granulometria, composição química, organização estratigráfica, como para o ambiente de deposição. Na Gruta da Escada a textura predominantemente argilosa encontrada nas fácies, os elevados percentuais de  $\text{SiO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}_3$ , a estratigrafia com contatos erosivos, piso estalagmítico revestindo/selando o depósito, demonstram atributos comuns aos da região. Por outro lado, na Gruta Irmãos Piriás, a característica fluvial e o produto residual da rocha ( $\text{SiO}_3$ ) deram novas informações sobre tipos de configurações para depósitos de sedimentos clásticos em cavernas do carste Lagoa Santa, onde a granulometria, estratigrafia e a composição química dos sedimentos sofrem forte influência hídrica, concentrando ainda mais óxidos de  $\text{SiO}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , além de fornecer um ambiente de mistura dos materiais, e organização das fácies representadas por laminações e lentes, associadas a oscilação do nível de água. Particularmente as altas concentrações de sílica podem estar relacionadas ao resíduo insolúvel da rocha (membro Pedro Leopoldo), que apresenta concentrações importantes de sílica (23%), alumínio (2,95%) e ferro (1,75%), superiores às observadas nos calcários do Membro Lagoa Santa.

Palavras-chave: Sedimentos. Cavernas. Carste Lagoa Santa. Origem. Transporte. Deposição.

## Abstract

The organization, analysis and discussion of the sediments found in some caves in the karst region of Lagoa Santa was the objective of this project, which had as an initial stage the survey of those caves that contained investigated clastic sediments and their data available in the literature, in which the first models on origin, transport and deposition were suggested.

In general, the main authors on the subject in the region demonstrate that the sediments found in the caves come from the metapelitic cover (siltites and claystones) of the Serra de Santa Helena Formation, which gave rise to the current pedological cover – allochthonous. This unconsolidated material reaches the caves through widened fissures and crevices – epikarstic material, and with the coupling between the openings of the caves and the slope. They have high percentages of  $\text{SiO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and important concentrations of  $\text{FeO}_3$ , indicating longer exposure time to leaching conditions and mineral concentration – oxidation and reduction. The autochthonous clastic sediments are characterized by collapsed blocks of varied granulometry, speleothem fragments and the rock waste product, which for the limestones of the Lagoa Santa Member, is incipient. As for the transport mechanisms, mud or debris and suspension races prevail. These mechanisms promote the mixing and selection of the unconsolidated material according to the deposition environment (duct network), which impose different conditions for the circulation of water, often in the same gallery. As for the organization of sediments - stratigraphy, they present sequences of clayey sedimentary facies (often cemented by calcite), between red and yellow, with fossiliferous remains of extinct megafauna, current fauna and limestone fragments, interspersed by calcitic levels (stalagmite floors).

Thus, new caves with sediment deposits that could be analyzed were selected: Gruta da Escada and Irmãos Piriás. Seizing a mixture of deposition environments influenced by fluvial/lacustrine processes (Gruta Irmãos Piriás) and vadoso (Gruta da Escada), descriptive and laboratory analyzes of the sedimentary facies surveyed in the two caves were carried out to relate the origin, transport mechanisms and the environment of deposition to which they were submitted. The models of origin, transport and deposition mechanisms presented by several authors for the deposits in

caves in the region were corroborated, both in terms of particle size, chemical composition, stratigraphic organization, as well as for the deposition environment. In Gruta da Escada, the predominantly clayey texture found in the facies, the high percentages of  $\text{SiO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{FeO}_3$ , the stratigraphy with erosive contacts, stalagmite floor covering/sealing the deposit, demonstrate attributes common to those of the region. On the other hand, in Gruta Irmãos Piriás, the fluvial characteristics and the rock waste product ( $\text{SiO}_3$ ) provided new information on types of configurations for clastic sediment deposits in caves of the karst Lagoa Santa, where the particle size, stratigraphy and chemical composition of sediments suffer strong water influence, concentrating even more  $\text{SiO}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oxides, in addition to providing an environment for mixing materials, and organization of facies represented by laminations and lenses, associated with oscillation of the water level. Particularly the high silica concentrations may be related to the insoluble rock residue (Pedro Leopoldo member), which presents important concentrations of silica (23%), aluminum (2.95%) and iron (1.75%), higher than those observed in the limestones of the Lagoa Santa Member.

Keywords: Sediments. Caves. Karst Lagoa Santa. Origin. Transport. Deposition.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Perfil de alteração ou perfil de solo ou regolito. Adaptado de Delvigne, 2008. .....	20
Figura 2 – Série de Goldich demonstrando a ordem de estabilidade dos minerais frente à velocidade do intemperismo – classificação granulométrica sedimentar. Fonte: adaptado de Toledo <i>et al.</i> (2003). .....	21
Figura 3 – Esboço mostrando fontes clásticas de sedimentos e o papel do sistema de condutos como câmara de mistura. Fonte: adaptado de White (2007). .....	23
Figura 4 – Principais mecanismos de entrada (origem), transporte e depósitos em cavernas. Adaptado de Walsh (2013); baseado em Gillieson (1996). .....	25
Figura 5 – Diagrama energia x granulometria, apresentando as curvas de velocidade crítica de transporte e erosão. A curva de transporte (inferior) representa as velocidades necessárias para colocar em movimento grãos isolados de diferentes tamanhos. A curva intermediária representa as velocidades necessárias para erodir leitos friccionais formados por grãos de diferentes tamanhos. A curva superior representa as velocidades necessárias para erodir leitos coesivos formados por grãos de diferentes tamanhos. Adaptado Filip Hjulström (1935), in Teixeira (2012). .....	30
Figura 6 – Representação esquemática do transporte por saltação e suspensão. Adaptado de Christopherson; Birkeland (2017, p. 431). .....	31
Figura 7 – Representação esquemática da relação entre a elevação de cavernas, o aprofundamento de dolinas e níveis de preenchimento e a erosão de cavernas no carste de Lagoa Santa. T1: nível de preenchimento (I-1) ficará acima do teto da caverna; remoção parcial ou total dos sedimentos pode ocorrer, embora as camadas de calcita (linhas horizontais negras) possam permanecer (pelo menos parcialmente) preservadas. T2: nível máximo de preenchimento (I-2) não alcançará mais o teto da caverna. T3: a caverna estará localizada muito acima do nível da dolina para ser afetada pelo sedimento de preenchimento ou fases de remoção. Neste esquema simplificado, as camadas mais jovens de calcita e sedimento tenderão a ocupar as porções inferiores das passagens das cavernas. Fonte: Auler <i>et al.</i> (2009). .....	36
Figura 8 – Localização das cavernas investigadas (círculos amarelos) e principais rios da região cárstica de Lagoa Santa. ....	40

Figura 9 – Bacia hídrica da Gruta da Escada. Seta vermelha indicando a entrada principal.....	42
Figura 10 – Vista externa da entrada da cavidade. Movimento de massa recente expôs a rocha e a cobertura pedológica nas imediações da entrada da caverna. ....	42
Figura 11 – Entrada principal da caverna, hoje parcialmente obstruída, com restos de preenchimento.....	42
Figura 12 – Morfologia de uma de suas galerias. No teto, canal característico de processo paragenético. ....	42
Figura 13 – Mapa topográfico da Gruta da Escada. Fonte: GBPE, 2004. ....	43
Figura 14 – Vista externa do morro onde o desenvolvimento da caverna se insere. ....	45
Figura 15 – Porção junto a entrada da caverna. ....	45
Figura 16 – Córrego e salão com altura superior a 15 metros. Porção intermediária da caverna. ....	45
Figura 17 – Porção onde se tem acesso ao nível superior da caverna.....	45
Figura 18 – Mapa topográfico com seções e perfil da Gruta Irmãos Piriás. Fonte: SEE, 1992. ....	46
Figura 19 – Rio das Velhas e suas águas barrentas na divisa entre os municípios de Matozinhos e Jaboticatubas, com maciço calcário associado. Fonte: Rosário, 2006. ....	47
Figura 20 – Córrego da Jaguará nas proximidades da Fazenda Castelo da Jaguará, Matozinhos. Fonte: Rosário, 2005.....	47
Figura 21 – Hidrografia das áreas de estudo, bacias de contribuição (em azul canto esquerdo) e cavernas (setas vermelhas). Fonte: IGAM, 2010. ....	48
Figura 22 – Plantas baixas das Grutas da Escada e Irmãos Piriás com indicação da direção da drenagem (setas azuis) e entradas (setas vermelhas) posicionadas em imagem de satélite. ....	49
Figura 23 – Coluna estratigráfica da região do carste Lagoa Santa (modificado de Ribeiro <i>et al.</i> , 2016). ....	50
Figura 24 – Distribuição dos domínios estruturais na região cárstica de Lagoa Santa. Tuller <i>et al.</i> (1994). Adaptado de Piló (1998). ....	52
Figura 25 – Principais litotipos para região de estudo. Fonte: CPRM, 2014 (escala: 1:1.000.000). ....	54

Figura 26 – Bloco diagrama evidenciando os principais componentes do carste. Adaptado de Karmann, 2000.....	55
Figura 27 – Depressão de Mocambeiro, Matozinhos. Ao centro lagoas sazonais e lateralmente, afloramentos recobertos por vegetação densa. Fonte: Rosário, 2011. ....	57
Figura 28 – Paredão calcário associado à Gruta de Poções. No topo solo e vegetação instalada. Fonte: Piló, 2003. ....	57
Figura 29 – Domínio fisiográficos proposto por Auler, 1994. Adaptado de Auler, 1994. ....	57
Figura 30 – Modelo digital de elevação para as áreas de estudo e perfil topográfico com indicação das cavernas estudadas e principais drenagens superficiais. Curvas de nível 30 metros (SRTM, 2019). ....	58
Figura 31 – Mapa exibindo concentrações de cavernas na região cárstica de Lagoa Santa. Fonte: Canie/ICMBio/Cecav, 2021.....	60
Figura 32 – Mapa de solos da região do carste de Lagoa Santa. Fonte: IEF/SISEMA, 2020. PVAe18 – Podzólico Vermelho-amarelado eutrófico; PVAd8 – Podzólico Vermelho-amarelado distrófico.....	63
Figura 33 – Esquema de vertente associada a dolina proposto por Piló (1998). Região da Gruta do Baú. Adaptado de Piló, 1998. ....	64
Figura 34 – Exposição do epicarste em função de movimento de massa. Lapa Vermelha I, Pedro Leopoldo. Fonte: Rosário, 2020. ....	65
Figura 35 – Exposição do epicarste em função de movimento de massa, evidenciando entrada de sedimentos. Gruta da Escada, Matozinhos. Fonte: Rosário, 2021. ....	65
Figura 36 – Média pluviométrica na estação do aeroporto Tancredo Neves. Fonte: Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (2017) in Lott, 2019.....	66
Figura 37 – Localização das Grutas da Escada e Irmãos Piriás (círculos amarelos), e outras cavernas cujos depósitos já foram estudados (círculos vermelhos).....	69
Figura 38 – Planta baixa da caverna, seções morfo-sedimentares, seções estratigráficas e delimitação das fácies – seção 1, seção 2 e seção 3. Gruta da Escada. ....	73
Figura 39 – Detalhe das fácies e diferença de cor. ....	75

Figura 40 – Material argiloso associado a base de um paleo canal e penetração de sedimentos.....	75
Figura 41 – Conduto onde é observado o depósito investigado.....	76
Figura 42 – Resto de preenchimento na porção distal do conduto. As laterais encontram-se extremamente cimentadas. ....	76
Figura 43 – Vista parcial do conduto e depósito ao fundo.....	77
Figura 44 – Detalhe do depósito: duas fácies bem diferenciadas – H e I.....	77
Figura 45 – Detalhe da fácies H em contato com a J.....	78
Figura 46 – Vista parcial da seção 03. O pontilhado mostra a posição da representação da seção.....	79
Figura 47 – Clastos de quartzo e calcário cimentados por carbonato de cálcio.....	79
Figura 48 – Morfologia do depósito – fácies K. ....	79
Figura 49 – Tamanho e grau de arredondamento dos clastos de quartzo. ....	79
Figura 50 – Planta baixa da caverna, seções morfo-sedimentares, seções estratigráficas e delimitação das fácies – seção 1, seção 2 e seção 3. Gruta Irmãos Piriás. ....	80
Figura 51 – Vista da galeria e posição onde se encontram os depósitos investigados (círculo vermelho).....	82
Figura 52 – Vista frontal do depósito investigado.....	82
Figura 53 – Detalhe do depósito: imbricamento, seleção e grau de arredondamento. Note depósito químico recobrimento porção do depósito. ....	82
Figura 54 – Vista frontal da coluna. Na base material clástico cimentado e, na superior, material areno-argiloso disposto em camadas. ....	84
Figura 55 – Detalhe da morfologia, tamanho e grau de arredondamento dos clastos da fácies A.....	84
Figura 56 – Nível de transição entre as fácies A e B.....	84
Figura 57 – Fácies B com níveis estratigráficos com variações granulométrica e de cor. Vestígios de bioturbação.....	84
Figura 58 – Detalhe da fácies C: níveis amarelados em meio a camadas avermelhadas.....	85
Figura 59 – Detalhe dos níveis da fácies B: camadas amareladas à alaranjadas arenosa entre material argiloso cinza.....	85

Figura 60 – Vista frontal do depósito. Note as manchas pretas na base da coluna. .	86
Figura 61 – Coluna expondo duas fácies: B na base com camadas arenosas intercalando material argiloso cinza; e C, argilosa com níveis mais amarelados. ....	86
Figura 62 – Resultado da análise dos principais componentes para os óxidos. O percentual do componente de cada variância está no canto esquerdo. c: coluna; A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-: fácies.....	89
Figura 63 – Organização dos principais resultados obtidos nas colunas na Gruta da Escada. Fácies, colunas, granulometria e química. ....	92
Figura 64 – Organização dos principais resultados obtidos nas colunas na Gruta Irmãos Piriás. Fácies, colunas, granulometria e química. ....	93
Figura 65 – Porção de solo exposto em vale associado a afloramentos de calcários. Região de Cerca Grande, Matozinhos. Fonte: Rosário, 2020. ....	94
Figura 66 – Frentes de alteração e fraturas preenchidas por sedimentos vermelhos provenientes do contato inferior do solo com a rocha (linhas amarelas). Gruta da Escada. Fonte: Rosário, 2021. ....	94
Figura 67 – Sucessão de níveis calcíticos intercalando depósitos (restos) sedimentares. Região da Lapa do Santo (carste de Lagoa Santa). Fonte: Rosário, 2003. ....	102
Figura 68 – Seleção granulométrica e níveis calcíticos. Região da Lapa do Santo. (carste Lagoa Santa). Fonte: Rosário, 2003. ....	102
Figura 69 – Vista parcial da seção sul da Lapa Vermelha IV, com as fácies sedimentares em destaque. Fonte: Piló, 2003. ....	104
Figura 70 – Organização estratigráfica e granulométrica dos principais depósitos de sedimentos clásticos investigados em cavernas da região cárstica de Lagoa Santa. ....	107

## Sumário

Introdução .....	16
1. Revisão da literatura para o Tema.....	18
1.1. Os Sedimentos Clásticos em Cavernas .....	18
1.1.1. Fontes e Classificação.....	20
1.1.2. Mecanismos de Transporte .....	29
1.1.3. Ambiente de Deposição.....	33
1.1.4. Estratigrafia .....	35
2. Contextualização do ambiente regional.....	38
2.1. Localização .....	38
2.2. As cavernas investigadas.....	41
2.2.1. Gruta da Escada.....	41
2.2.2. Gruta Irmãos Piriás.....	44
2.3. Hidrografia.....	47
2.4. Geologia.....	50
2.4.1. Formação Sete Lagoas .....	50
2.4.2. Formação Serra de Santa Helena .....	51
2.5. Geomorfologia.....	55
2.5.1. O carste superficial .....	55
2.5.1. O carste subterrâneo .....	59
2.6. Solos .....	61
2.6.1. A interface entre o carste superficial e o subterrâneo.....	64
2.7. Clima.....	65
2.8. Vegetação .....	66
3. Materiais e Métodos.....	67

3.1. Gabinete.....	67
3.1.1. Seleção da Amostra .....	67
3.2. Campo.....	70
3.2.1. Descrição das Fácies e Estratigrafia .....	70
3.2.2. Ambiente de Deposição.....	70
3.3. Análises Laboratoriais .....	71
3.3.1. Análise Granulométrica .....	71
3.3.2. Análise Química.....	71
4. Resultados.....	72
4.1. Descrição das Fácies.....	72
4.1.1. Gruta da Escada.....	72
4.1.2. Gruta Irmãos Piriás.....	79
4.1.3. Ambiente de Deposição.....	86
4.1.4. Análises laboratoriais.....	87
5. Discussão .....	94
5.1. Origem dos sedimentos – fontes.....	94
5.2. Mecanismos de deposição – transporte.....	99
5.3. Estratigrafia .....	101
5.4. Ambiente de Deposição .....	108
6. Conclusões .....	109
7. Referências Bibliográficas .....	115
8. ANEXO 1 .....	127

## Introdução

Há algum tempo os sedimentos em cavernas são alvo de investigações e utilização, desde a extração de minerais para fins comerciais (GOMES e PILÓ, 1992), como também para estudos científicos a exemplo da paleontologia (LUND, 1836, 1844). Não restam dúvidas sobre a capacidade peculiar de preservação e aprisionamento de sedimentos clásticos, químicos e biogênicos em sistemas de cavernas, compondo importante fonte para a compreensão de paleoambientes (GILLIESON, 1986; LAUREANO e KARMAN, 2013; PILÓ, 1998, 2004, 2005; AULER *et al.*, 2008, 2009; BOSCH e WHITE, 2004; WHITE, 2007; HERMAN *et al.*, 2012; HADDAD-MARTIM *et al.*, 2017).

A origem dos sedimentos encontrados nos depósitos de cavernas da região cárstica de Lagoa Santa, está relacionada principalmente às sequências sedimentares neoproterozoicas metapelíticas da Formação Serra da Saudade que ocorrem intercamadas a sequências carbonáticas, ambas hoje expostas junto à superfície e submetidas a processos erosivos e pedogenéticos (PILÓ, 1998, 2004, 2005; AULER *et al.*, 2008, 2009). Não há evidências de que os solos encontrados na região tenham como origem os calcários, tão fundamentais na produção dos fenômenos cársticos, mas, sobretudo, a partir do intemperismo e pedogênese de sequências não carbonáticas, a exemplo dos já referidos metapelitos.

O ambiente de deposição é controlado por uma rede de galerias subterrâneas que é distinto daquele encontrado em superfície. Além de variáveis ambientais de pouca oscilação, como temperatura, umidade e luminosidade que acabam por auxiliar na preservação desses depósitos, nessas galerias atuam fluxos hídricos que ao transportarem sedimentos clásticos proporcionam, em algumas situações, um ambiente de sedimentação marcado por condições hidrodinâmicas heterogêneas.

Na organização estratigráfica dos depósitos que ocorrem em rede de galerias, há certa complexidade na disposição das fácies sedimentares, podendo ocorrer inclusive estratigrafias reversas, onde os sedimentos em porções inferiores de galerias são mais jovens do que os superiores. Tentativas de correlacionar as fácies estratigráficas entre os depósitos de algumas cavernas da região, buscando

similaridades entre elas, foram propostas por Auler *et al.* (2006, 2009) e Araújo e Piló (2017), após analisarem colunas estratigráficas das cavernas Lapa do Baú, Macacos, Caianga, Lapa Vermelha IV e Sumidouro. Entretanto, tais autores destacam a inexistência de uma sequência estratigráfica regional para os depósitos, mas não esgotando a possibilidade de outras análises comparativas.

É neste contexto que se insere este trabalho, cujo objetivo principal está voltado para o reconhecimento e caracterização dos principais processos envolvidos tanto na entrada de sedimentos nas galerias subterrâneas de cavernas na região do carste Lagoa Santa, como também na sua deposição no interior delas. Para tanto, procedeu-se a descrição da organização estratigráfica e faciológica desses sedimentos, como subsídio à interpretação das condições hidrodinâmicas que resultaram na sua deposição. Quanto aos objetivos específicos deste trabalho, são eles: (i) selecionar na região do carste Lagoa Santa cavernas que contenham depósitos clásticos passíveis de investigação; (ii) reconhecer a distribuição espacial dos depósitos ao longo das galerias, segundo perspectiva em planta; (iii) elaborar seções estratigráficas dos depósitos selecionados, segundo perspectiva em perfil, mediante identificação de possíveis fácies; (iv) caracterizar os sedimentos que integram os depósitos a partir de análise macromorfológica das fácies sedimentares identificadas; (v) submeter as amostras coletadas das fácies sedimentares a análises laboratoriais de granulometria e química total (10 principais elementos); e (vi) elaborar propostas quanto a entrada desses sedimentos nas galerias subterrâneas, seus mecanismos de transporte ao longo delas e suas condições deposicionais.

Com vistas ao alcance desses propósitos, o primeiro capítulo deste trabalho apresenta uma revisão da literatura que trata de sedimentos clásticos em depósitos de cavernas de maneira geral, onde são apresentados os principais modelos deposicionais levantados na literatura especializada. O segundo capítulo contextualiza o ambiente regional da área de estudo, buscando expor os principais atributos físicos intrínsecos aos processos cársticos. No terceiro são apresentados os materiais e métodos empregados para obtenção dos resultados. As cavernas investigadas são apresentadas no quarto capítulo, com suas respectivas plantas baixas contendo a localização das seções morfo-sedimentares elaboradas, além de fotos e descrições do ambiente deposicional. No quinto são exibidos os resultados

das análises descritiva, granulométrica e química das fácies identificadas, suporte que embasou a discussão elaborada no capítulo sexto onde são incorporados os depósitos sedimentares de cavernas já estudados na região do carste Lagoa Santa. E, por fim, o capítulo sete é reservado às conclusões sobre a origem, os mecanismos de transporte e o ambiente de deposição atuantes nestes sedimentos que condicionaram a sua organização estratigráfica.

## **1. Revisão da literatura para o Tema**

### **1.1. Os Sedimentos Clásticos em Cavernas**

O termo sedimento vem do latim, *sedis*, que significa assento, deposição. Sedimento, numa tradução literal, é todo material sólido que se deposita, que se depositou ou é passível de depositar. Apesar de o termo carste estar relacionado diretamente aos processos de dissolução das rochas, a associação de suas feições superficiais (dolinas, vales cegos, uvalas) e subterrâneas (condutos) constitui armadilha natural que contém e preserva sedimentos autóctones (elúvio e fragmentos de rocha) ou alóctones, esses últimos fruto do transporte oriundo do entorno (LAUREANO, 1998).

Os detritos transportados e depositados ao longo de galerias cársticas podem ser genericamente designados como sedimentos clásticos. São também assim designados fragmentos de espeleotemas (originalmente os depósitos químicos) e sedimentos orgânicos não clásticos retrabalhados no interior das cavernas pela ação da gravidade e por processos fluviais e lacustres.

Quanto aos sedimentos orgânicos, também geram detritos no interior das galerias, como importantes acumulações de guano observadas em cavernas do mundo inteiro (*bat caves*), onde o tamanho da colônia e o tempo em que a comunidade reside na caverna serão determinantes nessa acumulação (MCFARLANE, 2004).

Houve, segundo Gomes e Piló (1992), a utilização desses depósitos para a produção de salitre para fabricação de pólvora, sobretudo no período colonial brasileiro. Por outro lado, tais depósitos foram e são alvo de pesquisas arqueológicas e paleontológicas há vários séculos.

Quando esses sedimentos adentram a rede de condutos, diferentemente dos depósitos superficiais, encontram um ambiente particular, muito em função das diversas variáveis proporcionadas pela rede de condutos e dinâmica hídrica envolvida. De maneira geral, os depósitos em cavernas caracterizam-se por depósitos de sedimentos inconsolidados, onde os processos pós-deposicionais atuam de maneira distinta daqueles que ocorrem junto à superfície.

Nas últimas décadas, caracterizações petrográficas e estratigráficas provocaram extraordinárias contribuições na análise da origem de sedimentos, bem como sua utilização como registros no quadro paleoambiental do Quaternário (BULL, 1980, 1981; MILSKE *et al.*, 1983; SASOWSKY *et al.*, 1995; QUINIF e MAIRE, 1998; LAUREANO, 1998).

Gillieson (1986), por exemplo, a partir da análise de sequências de sedimentos dentro de cavernas estudadas na Nova Guiné, sugere uma série de eventos deposicionais discretos, transportando sedimentos em lagos de água estagnada em galerias da caverna. Ainda de acordo com o autor, as estruturas sedimentares indicam múltiplas condições de fluxos, desde os relacionados a fluxos de lama até à decantação em água estagnada.

No Brasil, estudos desenvolvidos de forma sistemática relacionados à sedimentação clástica em cavernas estão distribuídos em regiões cársticas carbonáticas de Minas Gerais (Lagoa Santa e Vale do Rio Peruaçu – Piló, 1989, 1997; Piló, 1998; Piló, 2000; Piló *et al.* 2004; Piló *et al.* 2005; Auler *et al.*, 2009; Haddad-Martim *et al.*, 2017; Barioni, 2018), da Bahia (Chapada Diamantina – Laureano, 1998 / Campo Formoso – Auler *et al.*, 2009) e entre os Estados de São Paulo e Paraná (PETAR – Ferrari, 1990; Karman, 1994).

De maneira geral, os sedimentos encontrados em depósitos de cavernas podem ser divididos em sedimentos orgânicos, químicos e clásticos. Importantes pesquisas relacionadas à paleontologia e arqueologia são desenvolvidas nesses depósitos, além de formulações de teorias sobre a gênese e evolução de redes de galerias, como a paragênese, proposta por Renault (1968). Atrelado a isso, importantes contribuições têm sido publicadas sobre a origem dos sedimentos, os mecanismos de transporte envolvidos e a dinâmica do ambiente de sedimentação. A fase contemporânea da análise de depósitos de sedimentos em cavernas contribui

notadamente na cronologia desses, mediante utilização de técnicas isotópicas de longo alcance temporal.

### 1.1.1. Fontes e Classificação

Os solos associados à superfície e a interface entre a porção basal do solo e a porção superior da rocha são, fontes tanto alogênicas como autigênicas em relação à bacia hídrica de contribuição atual da caverna e aos produtos insolúveis da rocha são a origem da maioria dos depósitos clásticos observados nas galerias subterrâneas (Figura 1). Esse material inconsolidado detêm características oriundas dos efeitos interligados do clima, relevo e organismos que atuam sobre o material de origem (SHINZATO,1998).

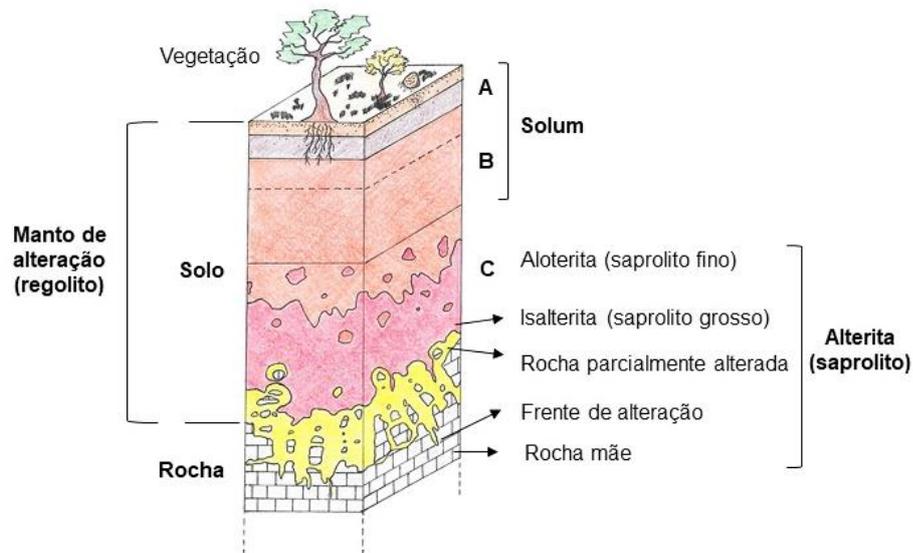


Figura 1 – Perfil de alteração ou perfil de solo ou regolito. Adaptado de Delvigne, 2008.

Nesse sentido, as rochas carbonáticas apresentam importante susceptibilidade à ação do intemperismo, seja ele físico, químico ou biológico. Os solos encontrados sobre rochas carbonáticas, material fonte de depósitos clásticos em cavernas, podem ser formados pela dissolução incongruente destes materiais (Santos *et al.*, 2011), onde a pureza do calcário influenciará diretamente na profundidade desses volumes, ou seja, quanto mais puro for o calcário menor é a quantidade de material residual. A

água, como principal agente do intemperismo, dissolve a calcita e a dolomita deixando materiais considerados como residuais e mais resistentes à dissolução (Figura 2).

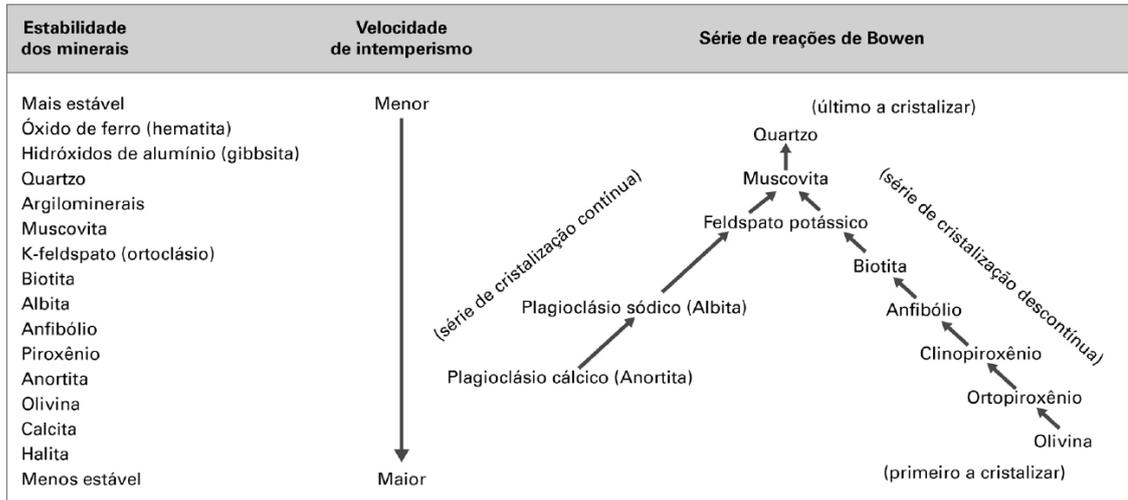


Figura 2 – Série de Goldich demonstrando a ordem de estabilidade dos minerais frente à velocidade do intemperismo – classificação granulométrica sedimentar. Fonte: adaptado de Toledo *et al.* (2003).

Os materiais sedimentares depositados em cavernas podem ser classificados quanto sua origem em alóctones e autóctones, como a maior parte dos autores indicam (LUND, 1843; FORD, 1975; WHITE, 1988; EK e QUINIF, 1988; FORD e WILLIAMS, 1989; PILÓ, 1998; LAUREANO, 1998; PILÓ, 2000; PILÓ *et al.*, 2004; PILÓ *et al.*, 2005; WHITE, 2007; SASOWSKY, 2007; AULER *et al.*, 2009; LAUREANO; KARMAN, 2013; HADDAD-MARTIM *et al.*, 2017; BARIONI, 2018). De maneira objetiva, alóctone é o sedimento que vem de fora da caverna. Nos estudos realizados por Gillieson (1986) e Ek e Quinif (1988), por exemplo, a fonte alóctone é caracterizada por material de categoria gravitacional, oriundo do ambiente superficial, predominantemente resultado de movimentos de massa rápidos dentro da bacia de contribuição das cavernas. Seguem essa linha: Karmann (1994) (Alto Ribeira/SP), Laureano (1998) e Torres *et al.* (2003) em cavernas profundas.

Já autóctone é o sedimento cuja formação ocorreu *in situ*, ou seja, dentro da caverna. São sedimentos derivados da ampliação das galerias de cavernas por abatimento de blocos e resíduos insolúveis da rocha (GILLIESON, 1986; PILÓ, 1998; PILÓ, 2000; LAUREANO, 1998; WHITE, 1988; 2007; LAUREANO e KARMAN, 2013).

Sobre o abatimento e movimentações de blocos, Bögli (1980) afirma que, quando do rebaixamento do nível freático, o campo de tensões no maciço busca novo estado de equilíbrio que pode ser conseguido pelo remanejamento de massa.

Quanto a fração insolúvel da rocha calcária, White (1988) destaca que é representada por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , inicialmente, e que a sílica pode ser encontrada como chert, grãos de areia autigênicos ou detríticos, ou como elementos de outros silicatos. E que o alumínio e ferro, estão relacionados a minerais de argila ou como óxidos hidratados. O resultado desse processo, geralmente observado em baixas quantidades nos calcários, é a acumulação do resíduo insolúvel da rocha.

Sintetizando a natureza dos depósitos encontrados em cavernas, Laureano (1998) propõe que todos os sedimentos químicos, orgânicos ou clásticos podem ser considerados depósitos de cavernas (Quadro 1), sendo:

- Sedimentos orgânicos: guano, fragmentos de madeira, folhas, ossos;
- Sedimentos químicos: carbonatos, sulfatos, nitratos, óxidos;
- Sedimentos clásticos: elúvio, colúvio e alúvio.

Sedimentos em Cavernas	Tipo	Depósito
	Orgânico	Guano, fragmentos de vegetais, fragmentos animais
	Químico	Carbonatos, sulfatos, nitratos
	Clástico	Elúvio, alúvio, colúvio

Quadro 1 - Natureza dos sedimentos. Fonte: Laureano (1998).

Na mesma linha, mas incorporando os sedimentos de origem antrópica, Farrand (2001) sugere a divisão em três categorias amplas de sedimentos associados à caverna ou abrigo sobre rocha:

- a) **geogênico**: endógenos (origem dentro da caverna) ou exógenos;
- b) **biogênico**: ossos, resíduos orgânicos de animais (guano de aves e morcegos, pelotas de regurgitação, coprólitos de mamíferos); e

c) **antropogênicos**: transportados para a caverna ou abrigo (terra, rochas, madeira), os transportados não intencionalmente (sedimentos finos, areia) e cinzas de fogueira e incêndios.

Ressaltando que o sistema de condutos atua como uma câmara de mistura onde os sedimentos observados podem ter múltiplas fontes, White (2007) apresenta os principais parâmetros de classificação de sedimentos que envolvem as velocidades de fluxo, volumes de fluxo, densidade de partículas e tamanho de partículas (Figura 3). Ele ainda observa que pode haver alguma contribuição de produtos orgânicos.

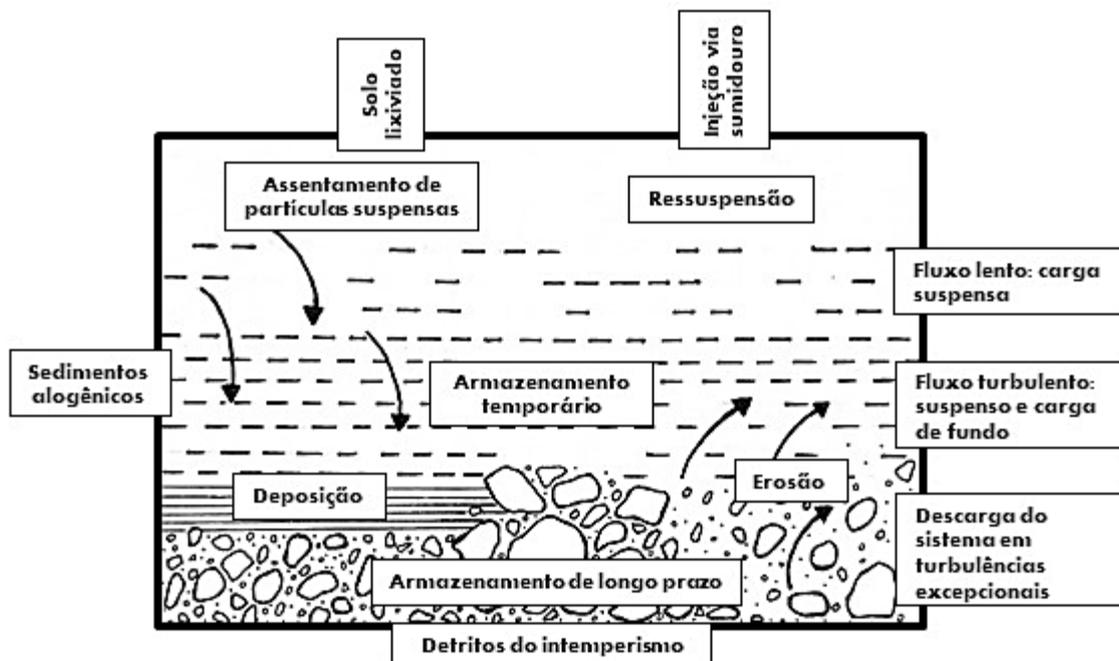


Figura 3 – Esboço mostrando fontes clásticas de sedimentos e o papel do sistema de condutos como câmara de mistura. Fonte: adaptado de White (2007).

De maneira geral e sintética (Quadro 2), de acordo com White (2007), os sedimentos podem ser classificados como:

Classe	Mecanismo(s) de Transporte	Origem	Morfologia e textura
Fluviais	tração, saltação e suspensão (acrecção paralelo)	alóctone com contribuição autóctone	Bancos e leitos fluviais em canais ativos; bancos e terraços com canais abandonados.

Classe	Mecanismo(s) de Transporte	Origem	Morfologia e textura
			Ampla variação textural: argila a seixo.
<b>Gravitacionais</b>	abatimentos (queda livre)	autóctone	Cones e pilhas irregulares, de tamanho variado, compostos por blocos de colapso, do teto ou paredes.
	fluxo de detritos (corrida de lama)	alóctone com contribuição autóctone	Cones, bancos e pilhas de sedimentos, muitas vezes preenchendo galerias. <i>Diamictons</i> , brechas matriz e clasto suportada.

Quadro 2 – Classificação dos sedimentos clásticos de cavernas (adaptado de White, 2007).

Já Sasowsky (2007) apresenta uma classificação fundamentada na origem do material clástico, onde o que se originou dentro da caverna seria denominado autogênico e o que foi transportado da superfície alogênico. O autor destaca que o material autogênico é caracterizado especialmente por abatimento de rochas que, no entanto, pode conter sedimentos finos derivados de resíduos insolúveis da rocha (durante o freático), fragmentos de espeleotemas, entre outros. Já os sedimentos alogênicos seriam descritos como alúvio, material eólico, fezes de animais (matéria orgânica), material fóssil etc. (Figura 4).

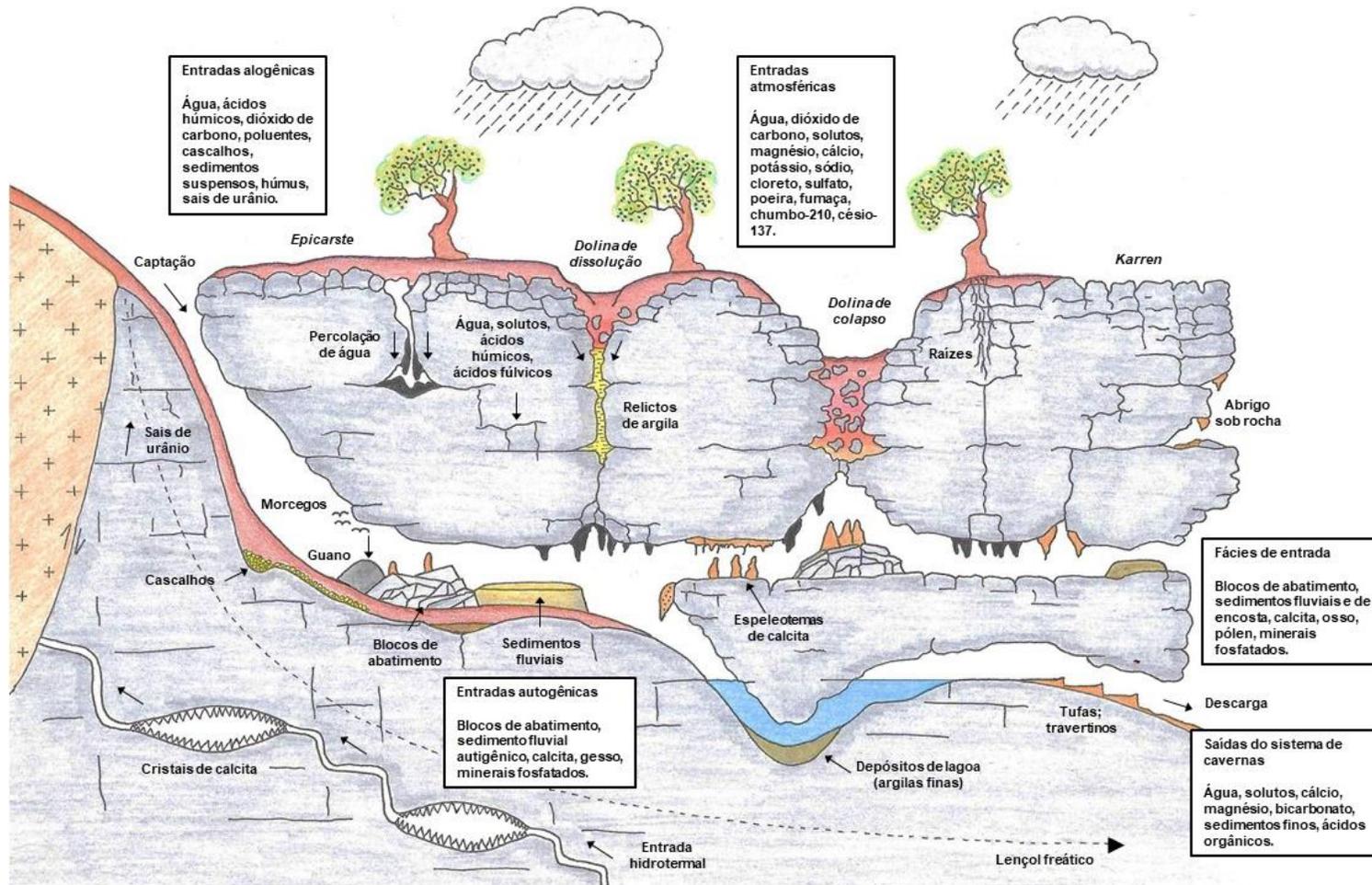


Figura 4 – Principais mecanismos de entrada (origem), transporte e depósitos em cavernas. Adaptado de Walsh (2013); baseado em Gillieson (1996).

#### 1.1.1.1. Sedimentos fluviais (zona de oscilação do nível d'água)

Sem dúvida que, do ponto de vista hidrológico, a circulação preferencial das águas em subsuperfície através da captura de cursos superficiais pelos condutos subterrâneos é a principal característica dessa classe (LAUREANO, 1998). Notadamente, a diferença marcante entre os sistemas fluviais de superfície e os subterrâneos é que a água e o sedimento no sistema subterrâneo estão confinados a um espaço delimitado pela rocha. Por consequência, flutuações drásticas podem ocorrer no nível d'água do curso, acarretando represamentos ou sifonamentos relevantes (LAUREANO, 1998).

Os sedimentos fluviais de cavernas, de acordo com White (1988), são análogos aos aluviões de superfície, os quais podem ser transportados por condutos em condições freáticas (*water filled*) ou vadosas (rios subterrâneos) (LAUREANO, 1998).

Nesse sentido a deposição de sedimentos finos em condições de fluxo estagnado é a principal característica que diferencia os sedimentos de cavernas dos de superfície, conferida através de deposição por acreção paralela – mecanismo de superposição de lâminas, de partículas na granulometria silte fino a argila, replicando a morfologia da superfície de deposição (BULL, 1976).

Os depósitos de origem fluvial em condutos cársticos podem ser descritos ainda por meio de outras feições correspondentes aos de superfície, através de critérios geomorfológicos, como a presença de níveis de terraços (Quinif e Maire, 1986), ou pela presença de estruturas sedimentares referentes ao transporte por fluxo aquoso unidirecional, como marcas onduladas assimétricas e seixos imbricados (VALEN e LAURITZEN, 1989; PINEDO, 1989). Ainda, segundo Herman *et al.* (2012), as fácies de canal e de talvegue, apontadas por White (2007), envolvem depósitos transportados como carga de fundo.

#### 1.1.1.2. Sedimentos lacustres (zona de oscilação do nível d'água)

É principalmente por meio de processos relacionados à oscilação do nível de água que os sedimentos se depositam em ambientes subterrâneos sob influência

lacustre. A partir de observações em sedimentos lamosos, Bull (1980) afirma ser consequência da deposição em lagos subterrâneos, onde houve a contribuição de várias fontes hídricas transportando sedimentos ao longo de aberturas da rocha.

Nesse sentido, Gillieson (1986) descreve *diamictons* (clastos de matriz suportada) que progridem pelos condutos e depositam-se em “remansos”, ou seja, em ambiente de águas estagnadas.

Não obstante, Quinif e Maire (1998) denominaram como varves depósitos em função das laminações rítmicas. Gillieson (1986) ainda apresenta depósitos com estruturas sedimentares equivalentes às de turbiditos, produzidos pela deposição de fluxos de detritos em lagos.

Também relacionado ao ambiente lacustre, Springer *et al.* (1997) utilizam o termo fácies *slackwater*, indicando sedimentos contidos em cavernas no Estado da Virgínia, EUA, em períodos de grandes inundações, onde quatro fácies se assentavam abaixo do nível d’água (*diamicton* - clastos de matriz suportada, areia laminada, ritmitos de silte-argila e lamitos arenosos).

Com mesmo entendimento, entre as associações de fácies descritas por Bosh e White (2007), quatro encontram-se arranjadas no ambiente da zona de oscilação do nível d’água, onde as relacionadas ao ambiente fluvial seriam as fácies de canal e de talvegue e as fáceis de águas estagnadas (*slackwater*) seriam associadas ao ambiente lacustre ou epifreático.

Por outro lado, para os sedimentos encontrados na zona freática, ou seja, em galerias totalmente inundadas, Ford e Williams (1989) argumentam que todas as classes texturais de sedimentos podem ser observadas, mas que siltes e argilas laminados dominam no ambiente.

Também em ambiente freático, análises de sedimentos na Mystery Cave (Minnesota, EUA) conduzidas por Milske *et al.* (1983) conferiram laminações plano-paralelas de camadas mistas de silte e argila.

Empregando a terminologia fácies de pântano (*backswamp facies*), caracterizada pelo fluxo limitado e pouco transporte lateral, Bosh e White (2007) agrupam depósitos registrados em cavernas labirínticas, relacionando-os ao resíduo insolúvel e materiais incutidos da superfície que chegam até essas galerias inundadas

e são prontamente depositados. Ainda de acordo com os autores, devido ao menor grau de seleção, se distinguem da fácies de águas estagnadas.

#### 1.1.1.3. Sedimentos gravitacionais (ambiente vadoso)

Os abatimentos de tetos e paredes de galerias participam de processos representativos dentro da evolução de sistemas cársticos. Apresentam-se, geralmente, em acumulações pequenas e isoladas podendo chegar a amplos depósitos com grandes blocos de rocha. Esses sedimentos clásticos podem exercer função significativa na história deposicional de uma caverna ao produzir detritos no interior dos condutos que, por vezes, modificam a direção e condições de fluxo de água (LAUREANO, 1998).

De acordo com White (1988), os abatimentos podem ser produzidos a partir da retirada do suporte hidrostático (pressão e equilíbrio dos líquidos e dos gases) ou rochoso, da dilatação do gelo ou outros minerais em descontinuidades da rocha, ou ser intensificado em passagens verticais ou pelo ataque das águas superficiais.

Quanto as terminologias tálus de entrada ou fácies de entrada, utilizadas por White (1988) e Ford e Williams (1989), descrevem sedimentos mal selecionados e pouco estratificados que se dispõem na interseção entre as galerias subterrâneas e a superfície. São constituídos de detritos transportados especialmente por gravidade, análogos a depósitos de encostas, com, eventualmente, distintos estágios de bioturbação.

No entanto, quanto ao conceito de depósitos de entrada de cavernas utilizado por White (1988), Gillieson (1986), nos registros sedimentares analisados em cavernas no carste tropical de Nova Guiné, confirma que essa classe de depósito não é exclusividade das porções associadas às entradas de cavernas. Brechas matriz suportadas, exibindo mudança textural de silte a calhau, sem estratificação, são gerados simultaneamente no período de alta magnitude do regime pluviométrico e carregados para as cavernas como fluxos de lamas ou de detritos.

Tais processos também ocorrem dentro das galerias e grande quantidade de detritos podem penetrá-las por meio de descontinuidades expandidas no contato entre

o carste superficial e o subterrâneo, ou através de drenos verticais (LAUREANO, 1998). De acordo com White (2007), tais depósitos podem exibir arranjo coniforme no interior dos condutos e ter granulometria fina quando a origem são solos transportados via fissuras, ou compostos de sedimentos de granulometria mais grossa (fluxos de detritos), introduzidos via poços verticais.

De forma sintética, as fontes dos materiais inconsolidados encontrados nos depósitos de cavernas são classificadas como autóctones ou alóctones. As principais fontes autóctones são os blocos oriundos de abatimentos de teto e paredes em galerias e a porção insolúvel da rocha, além de matéria orgânica de origem animal e vegetal. Quanto às fontes alóctones, são relacionadas ao material inconsolidado presente na zona de contato entre o carste superficial e o subterrâneo e a sedimentos contidos em corpos fluviais e lagos.

#### 1.1.2. Mecanismos de Transporte

Com relação aos mecanismos de transporte de sedimentos clásticos para o interior de cavernas, a força da gravidade é a variável física básica em todos os fenômenos de sedimentação. No entanto, existem diferenças expressivas entre o transporte sedimentar pelas águas de um rio e pela massa viscosa que desmorona numa encosta. A diferença está no modo como a mistura de grãos/fluido e a influência da coesão, fricção, do choque mútuo ou da turbulência atuam nos sedimentos.

Com relação ao grão, pode sofrer mudanças químicas (mineralógicas) ou físicas (texturais) no transporte, em resposta a ação dos agentes de intemperismo e transporte (SUGUIO, 1973). Entre as mudanças químicas pode-se citar desde alterações nas superfícies de fraturas até a completa transformação ou mesmo a dissolução do mineral. As mudanças físicas incluem a redução de tamanho e o aumento do grau de arredondamento do grão (abrasão – desgaste, e cominuição – quebra).

Desta maneira, a partir da medida de proximidade de sedimentos clásticos de um tipo final estável proporcionado pelos processos de formação que agiram sobre eles, pode-se definir o seu grau de maturidade (SUGUIO, 1973). Entre os parâmetros

de avaliação da maturidade, destaca-se a relação entre minerais estáveis e instáveis (razão quartzo/feldspato); entre os físicos, a eliminação da matriz pelítica, a seleção granulométrica (grau de homogeneidade dos grãos quanto ao tamanho) e arredondamento.

Partículas de diferentes tamanhos podem apresentar velocidades e mecanismos de transporte individual diferentes (Figura 5). Os principais mecanismos de transporte assinalados para depósitos em cavernas são a suspensão, a saltação, a tração e os fluxos de detritos (WHITE, 2007).

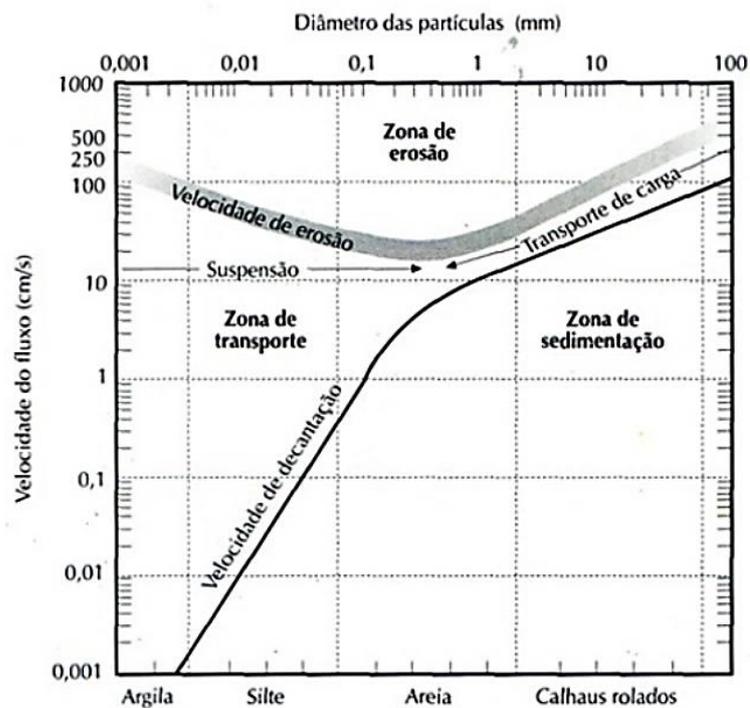


Figura 5 – Diagrama energia x granulometria, apresentando as curvas de velocidade crítica de transporte e erosão. A curva de transporte (inferior) representa as velocidades necessárias para colocar em movimento grãos isolados de diferentes tamanhos. A curva intermediária representa as velocidades necessárias para erodir leitos friccionais formados por grãos de diferentes tamanhos. A curva superior representa as velocidades necessárias para erodir leitos coesivos formados por grãos de diferentes tamanhos. Adaptado Filip Hjulström (1935), in Teixeira (2012).

De maneira sucinta, conceitualmente:

- A suspensão é o carreamento ou sustentação do grão acima da superfície deposicional.
- A saltação é a manutenção temporária do grão em suspensão.

- A tração ou rastejamento (*creep*) é o deslocamento do grão rente à superfície de deposição.
- Fluxo de detritos ou corridas de lama (*debris flow*) são movimentos de massa rápidos e desencadeados por fluxos de água na superfície que liquefaz o material.

Em um sedimento com certo intervalo de variação granulométrica, a população mais fina tende a ser transportada em suspensão, a mais grossa por tração e a intermediária por saltação.

A água impõe maior resistência e assim o deslocamento para cima, por saltação, no início do movimento dos grãos torna-se mais difícil. No ar a menor resistência na vertical faz com que a maioria dos grãos passe diretamente do repouso para a saltação e suspensão.

Já a deposição por suspensão ocorre na vertical e promove o acúmulo gradual dos grãos e o crescimento do leito sedimentar de baixo para cima (Figura 6). A deposição por tração deposita os sedimentos no sentido da tensão tangencial, com um forte componente paralelo ao leito sedimentar.

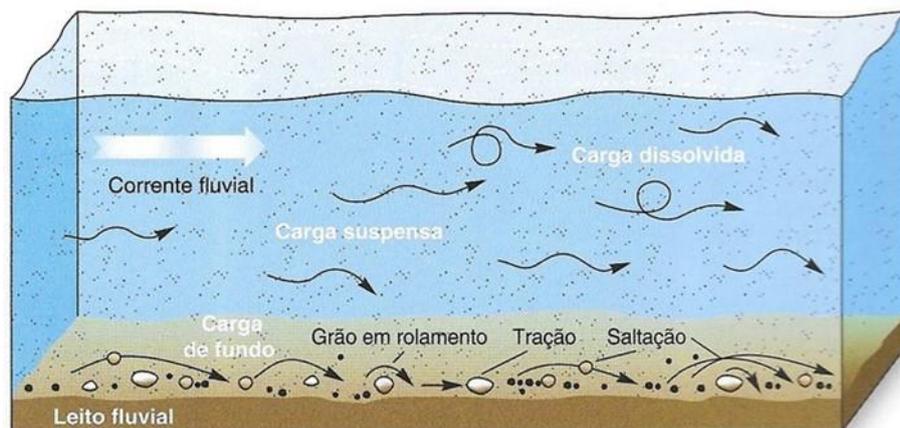


Figura 6 – Representação esquemática do transporte por saltação e suspensão. Adaptado de Christopherson; Birkeland (2017, p. 431).

Por certo, os fluxos gravitacionais constituem o tipo de fluxo em que a viscosidade elevada se deve a grande concentração de sedimentos. As três

características mais comuns aos tipos de fluxo gravitacionais, pelo olhar geológico, são:

- 1) a associação preferencial a declives;
- 2) a formação de depósitos com morfologia de lobos e/ou leques; e
- 3) o caráter episódico (dissipação de grande quantidade de energia e deslocamento de grande massa de sedimentos em tempo reduzido).

Para a sedimentologia há pelo menos seis variáveis principais de fluxos gravitacionais que podem ser diferenciadas: escorregamento, deslizamento, fluxo granular, fluxo de lama, liquefação e corrente de turbidez (SUGUIO, 1973). Aqui serão detalhados os que se relacionam com as características dos tipos de fluxo mais presentes em depósitos de cavernas, sendo:

- Fluxos granulares: o princípio físico do fluxo granular (*grain flow* ou *sand flow*) consiste numa pilha de grãos depositada com um ângulo natural de repouso, que fornecida energia adicional para o depósito a pilha se espalhará, passando a ângulos de repouso cada vez mais baixos.
- Fluxos de lama ou de detritos: no fluxo de lama ou de detritos (*mud flow* ou *debris flow*), a interação intergranular que garante o comportamento de fluxo gravitacional é dada pela matriz pelítica.
- As correntes de turbidez são misturas de água com sedimentos que se movem junto ao fundo sedimentar (maior densidade). Entre essas partículas e o fluido, o mecanismo de interação determinante das características do transporte é a turbulência.

Sobre estes mecanismos, White e White (1968) afirmam que no processo de transporte de sedimentos em canais subterrâneos operam os de tração/saltação (carga de leito) e suspensão.

Já Gillieson (1986) identifica a partir dos sedimentos clásticos registrados por ele em cavernas nas Terras Altas da Nova Guiné, que os processos específicos envolvidos no transporte destes materiais para o interior das cavernas seriam fluxos de lama, avalanches de detritos e quedas coluviais, desenvolvendo uma linha na diminuição da energia deposicional. Ainda de acordo com o autor, a análise micromorfológica da areia de quartzo desses sedimentos evidenciou o transporte

aquoso com colisão de grãos e abundantes pequenas fraturas geradas pelos impactos de grãos de alta velocidade.

Da mesma maneira, Torres *et al.* (2003) apontam os principais mecanismos de entrada de sedimentos na caverna Amutxate, onde fluxos e deslizamentos seriam responsáveis pela introdução de material alóctone (grosseiro e fino).

Ratificando e resumindo os conceitos envolvidos nos mecanismos de transportes, White (2007) argumenta que o transporte de sedimentos em canais abertos ocorre por dois mecanismos: carga suspensa e carga de fundo. A carga suspensa consiste em partículas em suspensão tomadas pela turbulência do fluxo da corrente. Essas partículas tendem a se depositar, mas são mantidas em suspensão pela turbulência. Ainda de acordo com o autor, a energia necessária para manter as partículas em suspensão e as que revolvem dependem do tamanho das partículas. Há uma ininterrupta troca de sedimentos, condicionada pelas condições do fluxo, de modo que se a velocidade do fluxo diminuir, por exemplo, com uma expansão de seção transversal da passagem ou por um represamento de água, sedimentos grossos desaparecem rapidamente, mas muito sedimentos de grão fino podem permanecer em suspensão.

### 1.1.3. Ambiente de Deposição

Para vários autores (Gillieson, 1986; Laureano, 1998; Piló, 1998; White, 2007) os principais ambientes de mobilização de deposição de sedimentos clásticos em sistemas de cavernas são a rede de condutos subterrâneos e suas respectivas conexões com a superfície e o contato entre subterrâneo e a subsuperfície, que podem ter dimensões reduzidas inacessíveis ao homem, caracterizar-se como entradas de cavernas ou encontrar-se recobertas. Numa mesma caverna, condicionada pela morfologia e relação topográfica com o nível de base, as galerias podem proporcionar um variado ambiente deposicional (LAUREANO, 1998; PILÓ, 1998; PILÓ *et al.*, 2005; AULER *et al.*, 2009; HADDAD-MARTIM *et al.*, 2017).

Já em condutos desconectados do nível d'água e em abismos, há deposição principalmente por ação gravitacional, provenientes de acoplamentos com a superfície.

Em ambientes semelhantes aos leitos fluviais superficiais, onde agrupam-se os canais e as planícies de inundação, são relacionados às galerias na zona de oscilação do nível d'água com curso subterrâneo ou eventualmente alagados (LAUREANO, 1998).

Quanto aos depósitos em ambientes lacustres, é um tipo recorrente de sedimentos de cavernas, como os lagos subterrâneos. Podem ser representados por represamentos ou associados à oscilação do nível de base.

Neste contexto, há cimentação de camadas de sedimentos por bandas de óxido de ferro ou calcita. Para Ford e Williams (1989) a precipitação química representa o principal processo de cimentação nestes sedimentos, sendo a calcita o mineral mais comum. A variação do nível de dureza pode variar de incipiente até a modificação do sedimento em uma sólida rocha, com pouca porosidade.

Da mesma maneira, Gillieson (1986) aponta que a migração de soluções por meio destes depósitos pode estar relacionada com o resultado de oscilação do nível d'água. O referido autor, na Nova Guiné, observou que as condições redutoras são sustentadas em sedimentos argilosos (sais ferrosos), já o aumento da porosidade admite a oxidação e a conservação de  $Fe^{+3}$  nos níveis siltosos.

Apontando para um ambiente dinâmico, Karmann (1994) destaca fases de deposição, erosão e retrabalhamento de sedimentos clásticos fluviais em cavernas do Alto Ribeira, influenciadas principalmente pela ação fluvial.

Por outro lado, Torres *et al.* (2003), em estudo de depósitos em cavernas profundas, apontam para um ambiente de baixa energia após a interpretação de fácies de sedimentos argilosos laminares, ao mesmo passo que sugerem sobre o grau de conservação dos fósseis uma influência importante do estado parcial de soterramento que esse material fossilífero se encontrava. Sedimentos em cavernas profundas são geralmente mais homogêneos, e sua composição final é uma integração de duas fontes de sedimentos autogênicos: o produto do intemperismo das rochas e materiais biogênicos; e materiais alogênicos transportados por rios.

Não restam dúvidas sobre a influência que a rede de condutos oferece à dinâmica de deposição dos sedimentos. Essa dinâmica pode retrabalhar todo material depositado, misturando sedimentos mais antigos aos mais jovens. Processos singenéticos e pós-deposicionais recorrentes em depósitos de cavernas estão

relacionados a precipitação de minerais secundários, como a calcita, imprimindo graus de dureza diferentes entre volumes de sedimentos - situação em que a água exerce papel imprescindível, mobilizando minerais e transportando-os ao longo da porosidade dos sedimentos.

#### 1.1.4. Estratigrafia

Quando depositados dentro das cavernas, devido à grande abrangência temporal de eventos, há um intenso retrabalhamento desses sedimentos em ciclos de erosão e deposição/redeposição (Osborne, 1984; Gillieson, 1986; Laureano, 1998), como mencionado no tópico anterior, podendo dar origem a estratigrafias normais ou reversas com mudanças laterais de fácies (OSBORNE, 1984; PILÓ, 2000; PILÓ, 1998; AULER *et al.*, 2009). Ou seja, as estratigrafias resultantes são geralmente complexas, e alguns processos deposicionais em cavernas exibem características singulares.

Assim, as principais estruturas sedimentares encontradas nesses depósitos cavernícolas são: imbricamento de seixos, estratificações cruzadas, reversas, laminações paralelas e onduladas, marcas de onda, estruturas de corte e preenchimento e marcas dendríticas (LAUREANO e KARMAN, 2013). A organização desses sedimentos no interior dos condutos está relacionada a episódios de: precipitação ocasional - de baixa magnitude, onde sedimentos finos são transportados em ambientes lacustres e em zona vadosa com oscilação do nível freático; e eventos de alta intensidade - esporádicos, onde sedimentos grossos são carreados em grandes precipitações torrenciais, não apresentando linearidade cronológica deposicional ou erosiva (AULER *et al.*, 2009).

Na estratigrafia reversa (Figura 7), por exemplo, onde registros mais jovens podem estar sob registros mais velhos, Osborne (1984) destaca a importância das discordâncias no exame estratigráfico atentando-se às mudanças laterais de fácies e suas implicações nas análises de seções colunares.

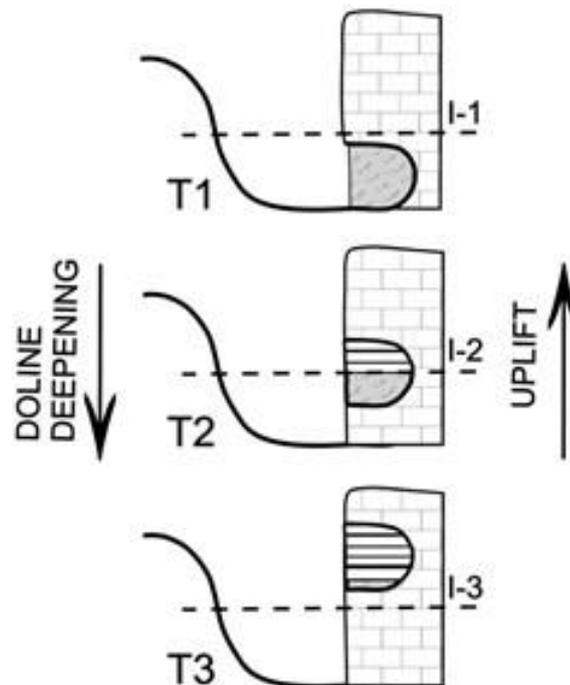


Figura 7 – Representação esquemática da relação entre a elevação de cavernas, o aprofundamento de dolinas e níveis de preenchimento e a erosão de cavernas no carste de Lagoa Santa. T1: nível de preenchimento (I-1) ficará acima do teto da caverna; remoção parcial ou total dos sedimentos pode ocorrer, embora as camadas de calcita (linhas horizontais negras) possam permanecer (pelo menos parcialmente) preservadas. T2: nível máximo de preenchimento (I-2) não alcançará mais o teto da caverna. T3: a caverna estará localizada muito acima do nível da dolina para ser afetada pelo sedimento de preenchimento ou fases de remoção. Neste esquema simplificado, as camadas mais jovens de calcita e sedimento tenderão a ocupar as porções inferiores das passagens das cavernas. Fonte: Auler *et al.* (2009).

Portanto, podem-se diferenciar os registros gerados nos vários tipos de ambientes deposicionais embutidos nos sistemas de cavernas através de suas características sedimentares (LAUREANO, 1998).

Ainda referente à sequência sedimentar, Gillieson (1986) aponta até seis fácies clásticas nas cavernas, a partir de seções estratigráficas pesquisadas nas Terras Altas da Nova Guiné, muitas vezes intercaladas por níveis estalagmíticos, todas assentadas sobre rocha.

Quanto às fácies, existem diversos esquemas propostos, utilizando-se de critérios variados para diferenciá-las. Para Laureano e Karman (2013), a maior parte das classificações faciológicas se aplica somente ao contexto locacional das cavernas, como vários autores que reúnem seus resultados em fácies descritivas,

baseadas em variações texturais, estruturas sedimentares, composição química e mineralógica dos sedimentos (MILSKE *et al.*, 1983; GILLIESON, 1986; SPRINGER *et al.*, 1997).

Por exemplo, Ford e Williams (1989) sugerem a diferenciação entre fácies de entrada e fácies de interior devido à relevância arqueológica associada à primeira e por sua complexidade estratigráfica. Da mesma maneira Torres *et al.* (2003) identificam duas fácies de preenchimento, sendo: fácies de entrada e fácies de galerias profundas (Jennings, 1985), onde a primeira pode sofrer influência de agentes arqueológicos.

Deve-se ressaltar que rios subterrâneos comumente oscilam para ambientes freáticos em eventos de inundação, onde o fluxo de sedimentos ao longo das galerias pode sofrer modificações no balanço. Via sumidouro são introduzidos sedimentos de textura variada, levando em consideração os atributos hidrológicos e geomorfológicos da bacia de captação. Nesse tipo de ambiente, as estruturas sedimentares mais recorrentes são iguais em conformação e condição de fluxo as registradas nos depósitos fluviais de superfície: estratificações cruzadas, laminações paralelas e onduladas, marcas de onda, estruturas de corte e preenchimento, imbricamento de seixos e marcas dendríticas (LAUREANO e KARMAN, 2013).

Outro exemplo de descrição de fácies, em ambiente associado à dinâmica fluvial, White (2007) as apresenta de acordo com o tamanho das partículas e o grau de seleção, a partir de modelo de Bosch e White (2004). Segundo o autor a maior variedade de tamanho e seleção de partículas está nos depósitos referentes à fácies de canal. As fácies de talvegue são derivadas da fácies de canal e são representadas por argilas que blindam os leitos de córregos ativos em cavernas. As fácies *slackwater* são as camadas finas de argila que repetidamente formam a camada superior final de depósitos clásticos. Essa fácies parece ter sido depositada a partir de sedimentos em suspensão que se estabeleceram em passagens de cavernas inundadas. As fácies *diamicton* (clasto matriz suportada) são o resultado de fluxos de detritos (White, 2007). Normalmente, são depósitos caóticos contendo partículas que variam de argilas a matacões, sem seleção. Tal depósito tem origem a partir de chuvas torrenciais e galerias de cavernas com alto gradiente, permitindo que sedimentos de

depósitos inteiros sejam transportados em suspensão e em seguida depositados em uma massa indiferenciada.

Da mesma maneira, para Herman *et al.* (2012) as fácies de canal são depositadas durante períodos hidrológicos comuns, exibem variação textural variada com, eventualmente, diversas subfácies descritivas, além de ter mudanças abruptas ao longo da seção estratigráfica. Enquanto as fácies de talvegue caracterizam-se por sedimentos muito grossos, selecionados, introduzidos em discordância em relação às fácies de canal, removido pela erosão durante eventos hidrológicos extraordinários.

Em resumo, devido a complexa dinâmica imposta pela rede de galerias, geralmente as estratigrafias encontradas nesse ambiente são de complexa interpretação, onde características particulares controlam a deposição de sedimentos. As principais estruturas sedimentares de depósitos em cavernas são imbricamento de seixos, estratificações cruzadas, reversas, laminações paralelas e onduladas, marcas de onda, estruturas de corte e preenchimento e marcas dendríticas. Essas características sedimentares podem ser diferenciadas a partir do ambiente de sedimentação. A técnica mais difundida para diferenciar volumes de sedimentos em depósitos de cavernas é a descrição de fácies. Notadamente, a diferenciação por fácies relaciona-se com os mecanismos de transporte e o tipo de material transportado.

## **2. Contextualização do ambiente regional**

### **2.1. Localização**

Os sedimentos clásticos aqui investigados encontram-se depositados em cavernas localizadas na região cárstica de Lagoa Santa, no município de Matozinhos (Figura 8). A área investigada está localizada a 40 km a norte de Belo Horizonte e, geologicamente, se encontra inserida na extremidade sul do Cráton São Francisco onde são comuns as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (Neoproterozoico).

Segundo Barbosa (1961) e Kohler *et al.* (1978), responsáveis pelas primeiras menções ao termo região cárstica de Lagoa Santa e por sua delimitação, tais limites seriam a leste o Rio das Velhas e a oeste do ribeirão da Mata, balizadores desse

recorte. No entanto, Piló (1998) argumenta que do ponto de vista geomorfológico o carste progride para o norte de Matozinhos, alcançando os municípios de Funilândia e Prudente de Moraes.

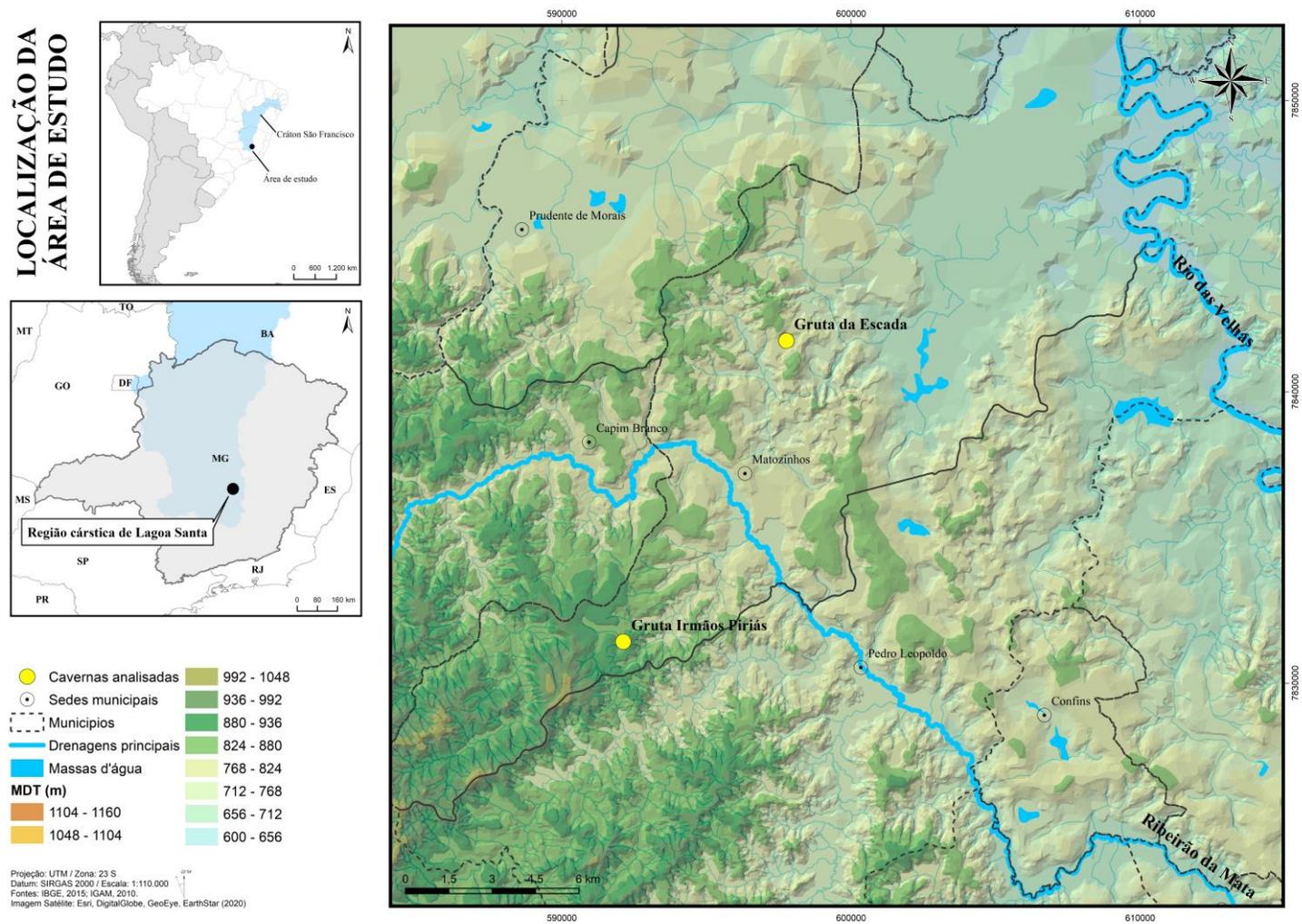


Figura 8 – Localização das cavernas investigadas (círculos amarelos) e principais rios da região cárstica de Lagoa Santa.

## **2.2. As cavernas investigadas**

### **2.2.1. Gruta da Escada**

A Gruta da Escada (CANIE<sup>1</sup>: MG-31) está localizada no município de Matozinhos em sua porção centro norte, no entorno da região de Poções que é reconhecida pela grande densidade de cavernas. Sob a coordenada UTM E597759 / N7841750 em altitude de 771m, está disposta no centro de uma dolina onde há um afloramento calcário com vários níveis de carstificação (Figura 9), evidenciados pela erosão da cobertura pedológica (Figura 10). A bacia hídrica arranjada à jusante da caverna é recoberta por pastagem até próximo a entrada da caverna e, no entorno, a leste e nordeste há ocorrência de mata seca. Com desenvolvimento em pelo menos 3 (três) níveis em planta (Figura 13), a caverna apresenta padrão reticular. Este padrão dominante é constituído por uma rede de galerias com orientação preferencial SW-NE, com mais de 2.000 metros de projeção horizontal, conectando-se a condutos menores perpendiculares, formando regiões labirínticas. Quanto a gênese, apresenta feições paragenéticas como pendentes e canais de teto, além de feições morfológicas freáticas (Figura 11, Figura 12).

---

<sup>1</sup> CANIE: Centro Nacional de Pesquisas Espeleológicas



Figura 9 – Bacia hídrica da Gruta da Escada. Seta vermelha indicando a entrada principal.



Figura 10 – Vista externa da entrada da cavidade. Movimento de massa recente expôs a rocha e a cobertura pedológica nas imediações da entrada da caverna.



Figura 11 – Entrada principal da caverna, hoje parcialmente obstruída, com restos de preenchimento.



Figura 12 – Morfologia de uma de suas galerias. No teto, canal característico de processo paragenético.

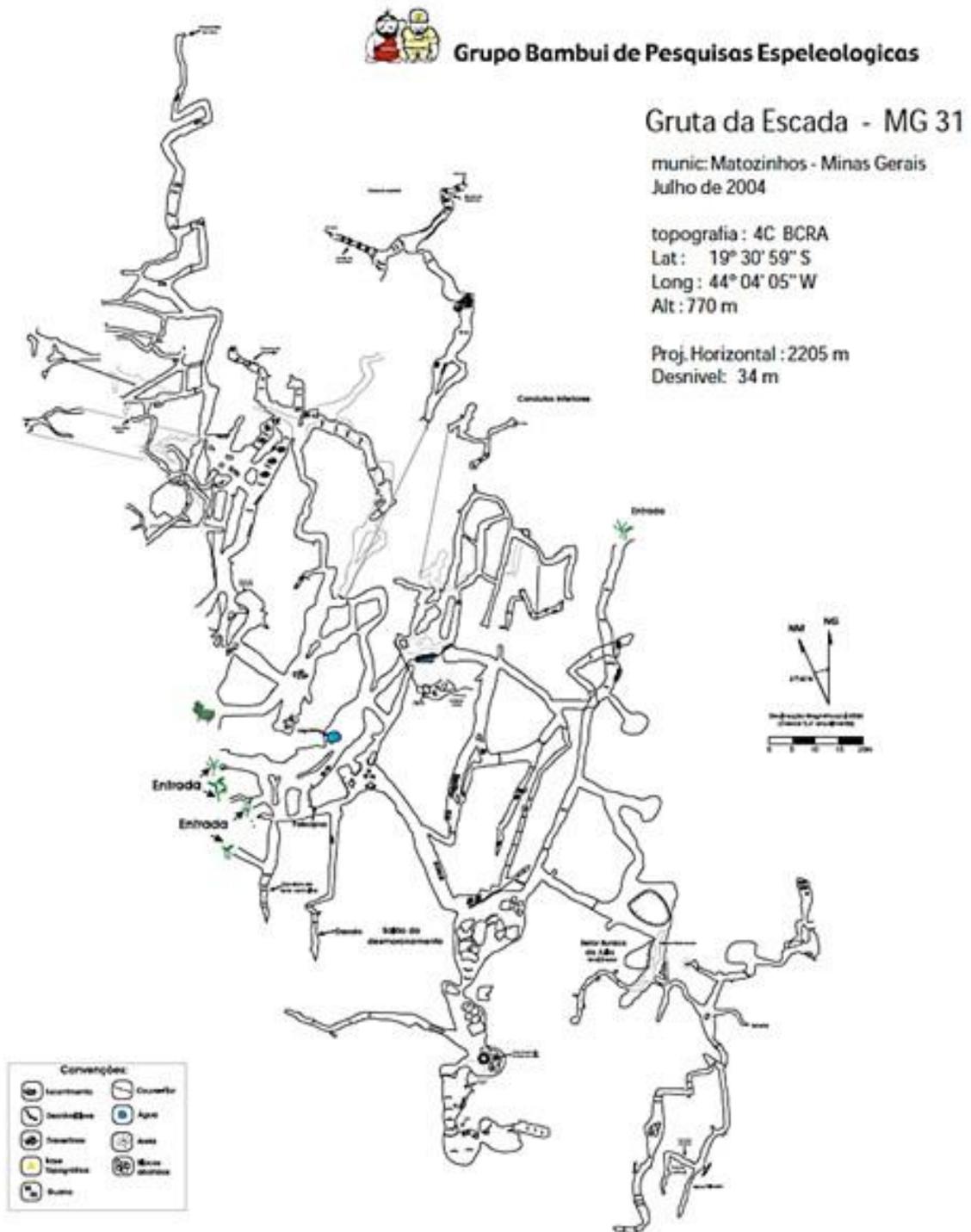


Figura 13 – Mapa topográfico da Gruta da Escada. Fonte: GBPE, 2004.

### 2.2.2. Gruta Irmãos Piriás

Cadastrada sob o número MG-823 no CANIE, a Gruta Irmãos Piriás está localizada na porção sudoeste do Município de Matozinhos, na margem oeste do Ribeirão da Mata (UTM: E592118 / N7831481 – alt. 810m) (Figura 14). De acordo com Silva *et al.* (2003) a caverna apresenta forma linear (em planta) e desenvolvimento horizontal (em perfil); as seções são de maneira geral irregulares (Figura 18). Em seu desenvolvimento, drena um pequeno córrego oriundo de uma bacia de captação à montante, que é capturado pela abertura principal, e sua ressurgência é observada a aproximadamente 700m a jusante, onde torna-se tributário do córrego da Lapa. Ainda segundo os autores, o fraturamento generalizado do litotipo carbonático condiciona a morfologia da Gruta (Figura 15, Figura 16 e Figura 17) além da zona de cisalhamento que promove o contato com rochas do embasamento. Quanto à sua gênese, são apontadas 3 (três) fases evolutivas para a formação da caverna, sendo a primeira freática (dolina), a segunda quando do recuo do nível freático (gênese e ampliação dos níveis superiores) e na terceira fase abertura do conduto no contato litológico e ampliação da galeria por abatimento de blocos (SILVA *et al.* 2003).



Figura 14 – Vista externa do morro onde o desenvolvimento da caverna se insere.



Figura 15 – Porção junto a entrada da caverna.



Figura 16 – Córrego e salão com altura superior a 15 metros. Porção intermediária da caverna.



Figura 17 – Porção onde se tem acesso ao nível superior da caverna.

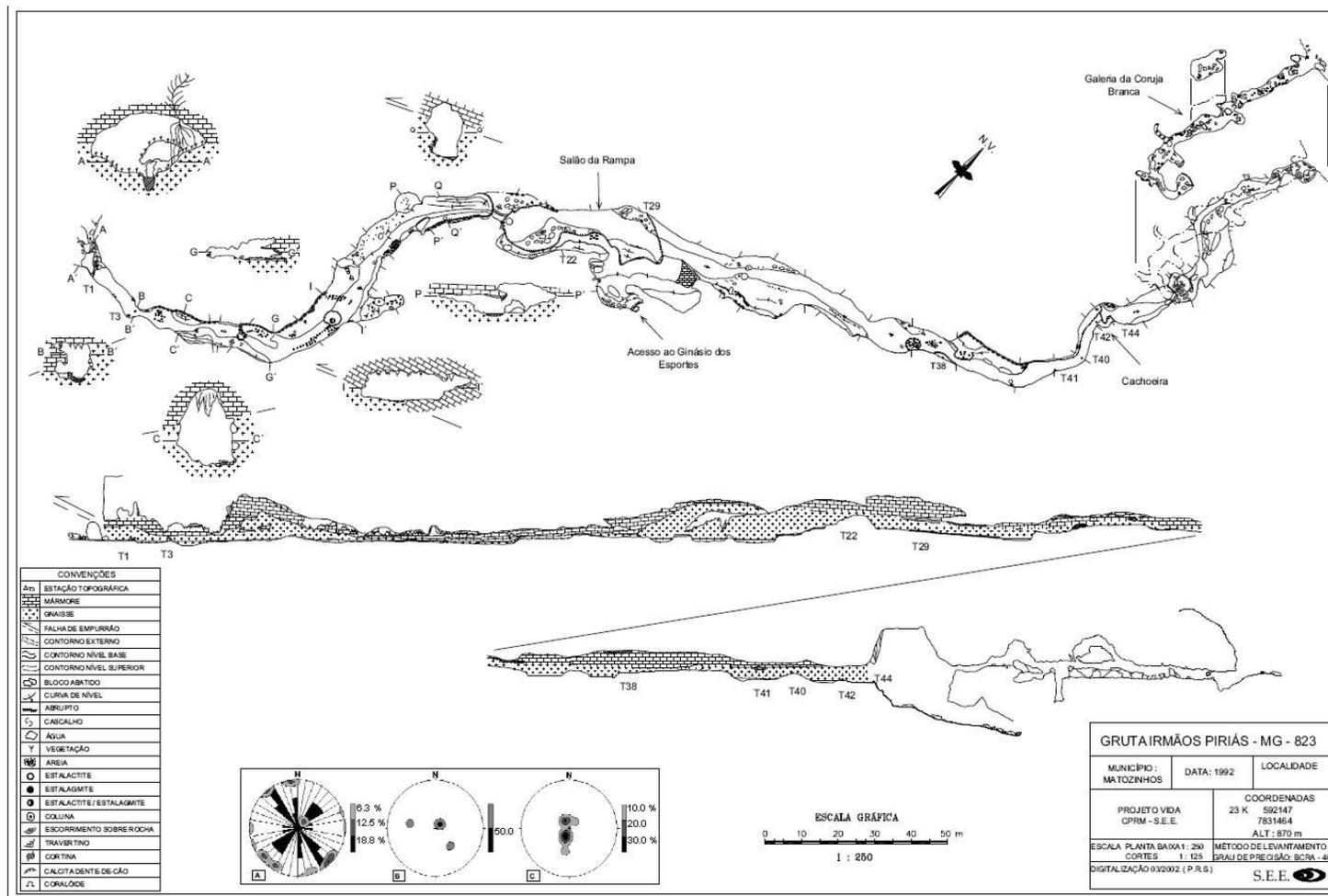


Figura 18 – Mapa topográfico com seções e perfil da Gruta Irmãos Piriás. Fonte: SEE, 1992.

### 2.3. Hidrografia

Quanto à hidrografia regional, as áreas de estudo estão inseridas na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, na sub bacia do Ribeirão da Mata afluente do Rio das Velhas. A rede hidrográfica da região da Gruta Irmãos Piriás está localizada a oeste do Ribeirão da Mata, com característica dendrítica, sendo afluente da margem oeste do Rio das Velhas, este último o nível de base regional. A outra área onde está localizada a Gruta da Escada, posicionada na porção norte do carste, exibe um misto de rotas subterrâneas com percursos em superfície, com destaque para o sistema córrego Palmeira-Mucambo.

Quando se trata de hidrologia, Auler e Piló (2015) argumentam que a do carste de Lagoa Santa é especialmente autogênica, com pequenas rotas de fluxo de águas subterrâneas (Figura 21). Há, aparentemente, uma convergência onde as drenagens superficiais tendem a ser capturadas por sumidouros, percorrendo pequenas distâncias pelo carste subterrâneo e surgindo na superfície (surgência), alimentando os principais córregos da área, como é o caso do córrego Palmeira-Mucambo que deságua no córrego da Jaguará (Figura 20), afluente do Rio das Velhas (Figura 19); além do córrego Samambaia e da Bucha que alimentam a Lagoa do Sumidouro.



Figura 19 – Rio das Velhas e suas águas barrentas na divisa entre os municípios de Matozinhos e Jaboticatubas, com maciço calcário associado. Fonte: Rosário, 2006.



Figura 20 – Córrego da Jaguará nas proximidades da Fazenda Castelo da Jaguará, Matozinhos. Fonte: Rosário, 2005.

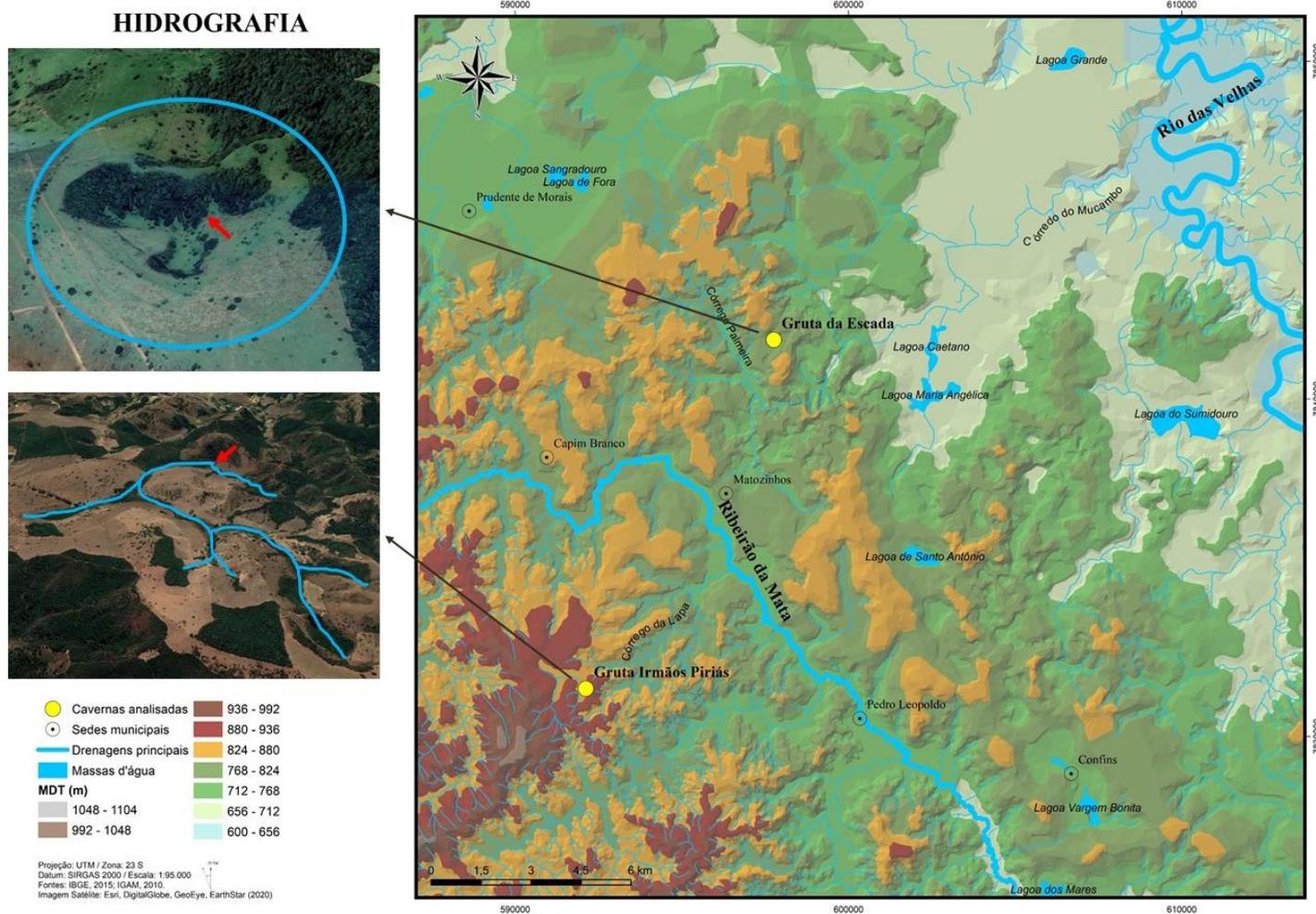


Figura 21 – Hidrografia das áreas de estudo, bacias de contribuição (em azul canto esquerdo) e cavernas (setas vermelhas). Fonte: IGAM, 2010.

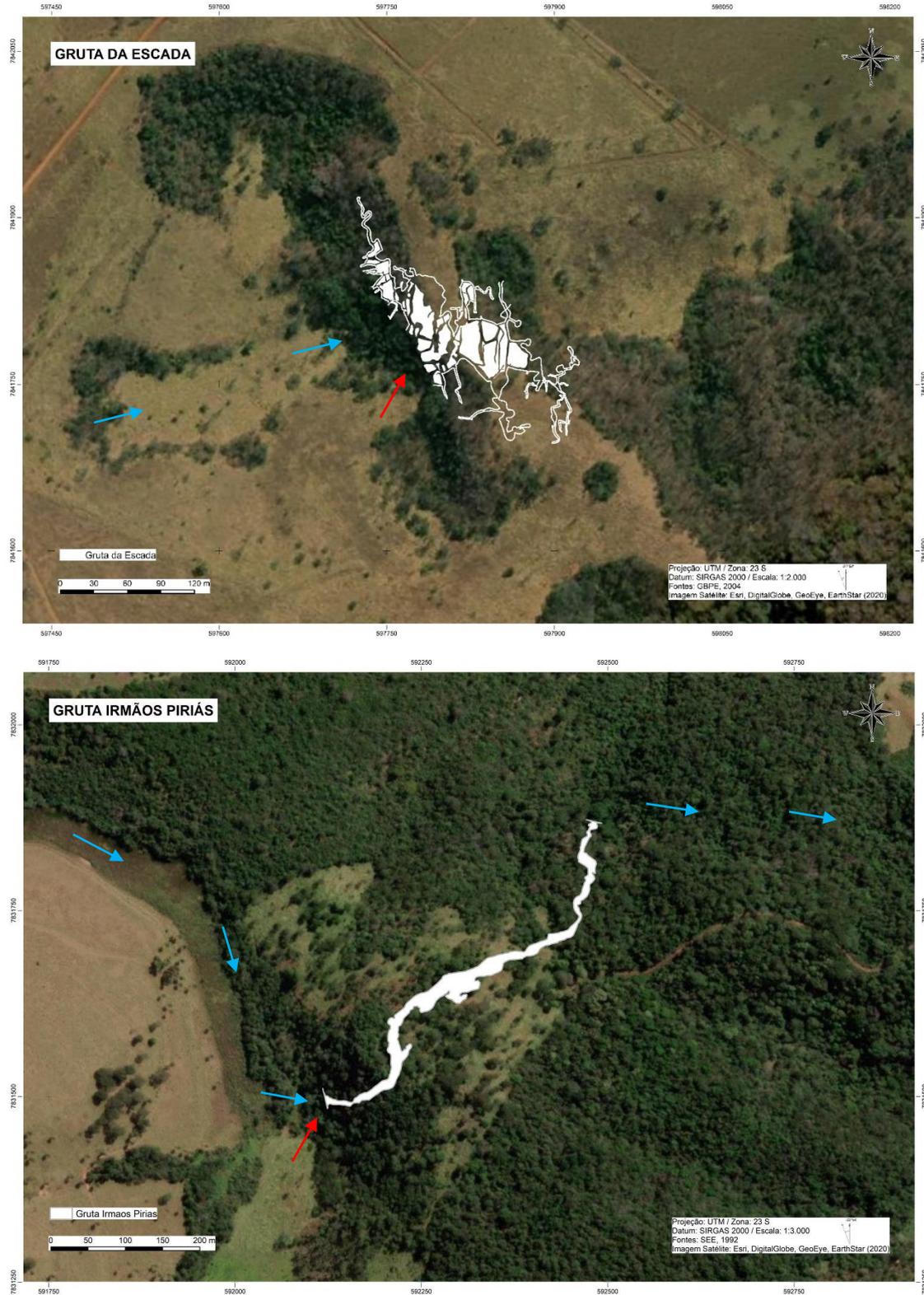


Figura 22 – Plantas baixas das Grutas da Escada e Irmãos Piriás com indicação da direção da drenagem (setas azuis) e entradas (setas vermelhas) posicionadas em imagem de satélite.

## 2.4. Geologia

Delimitada pela ocorrência de rochas carstificáveis, a região cárstica de Lagoa Santa está inserida na porção sul do Cráton São Francisco, onde seqüências de material terrígeno e químico do Grupo Bambuí foram depositadas durante o Proterozoico Superior. Nessa região é possível observar as duas formações que ocupam a base da seção estratigráfica do Grupo Bambuí, as formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena (Figura 23), como também as rochas gnáissico-granítico-migmatíticas que integram o Complexo Belo Horizonte.

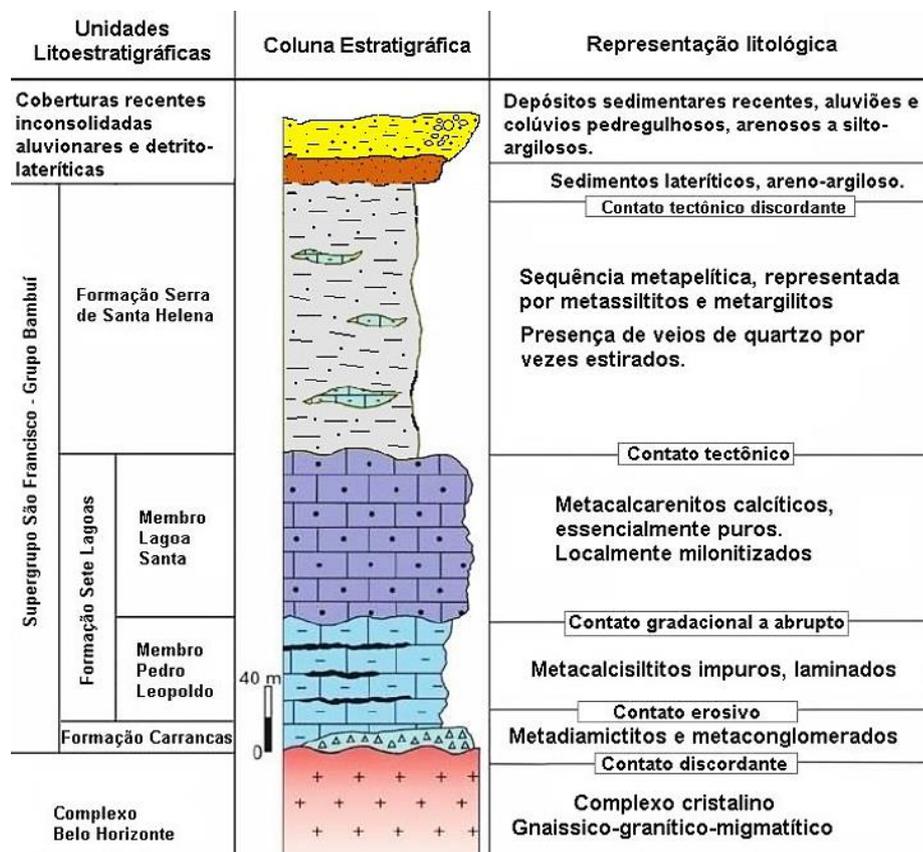


Figura 23 – Coluna estratigráfica da região do carste Lagoa Santa (modificado de Ribeiro *et al.*, 2016).

### 2.4.1. Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas na região foi dividida por Schöll (1976) nas fácies Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, mais tarde elevadas a membros por Tuller *et al.* (1992) (Figura 23).

Composto por intercalações recorrentes entre leitos delgados a muito finos de pelitos, o Membro Pedro Leopoldo possui cor cinza esverdeado, camadas delgadas a médias de calcissiltitos e/ou microespatitos, de tonalidade cinza-claro a médio. Segundo Tuller *et al.* (1992), este membro corresponde à base da Formação Sete Lagoas na região, assentado sobre o embasamento geralmente por falha de deslocamento, mostrando contato abrupto e discordante.

Quanto ao Membro Lagoa Santa, litotipo que permeia a área investigada, constitui-se de calcários tipos calcarenito, calcissiltito, brechas, estromatólitos e milonitos protoderivados (TULLER *et al.*, 1992). Estão localizados majoritariamente no interior do planalto cárstico de Lagoa Santa, com espessuras variadas, podendo atingir 150m (PILÓ, 1998). Esses calcários exibem-se de maneira homogênea, cinza-escuro e bandeados, com mais de 90% de CaCO<sub>3</sub>.

#### 2.4.2. Formação Serra de Santa Helena

De acordo com Schöll (1976), a Formação Serra de Santa Helena arranja-se predominantemente de clásticos finos (filitos e siltitos), com intercalações de margas e calcários locados na base. Esta Formação é foliada, possui deformação dúctil e é atravessada por veios de quartzo.

Segundo Piló (1998), nessa Formação, os metapelitos filíticos não foram encontrados aflorando no interior do planalto cárstico.

Quanto aos domínios estruturais (Figura 24), Tuller *et al.* (1992) individualizaram a região em três:

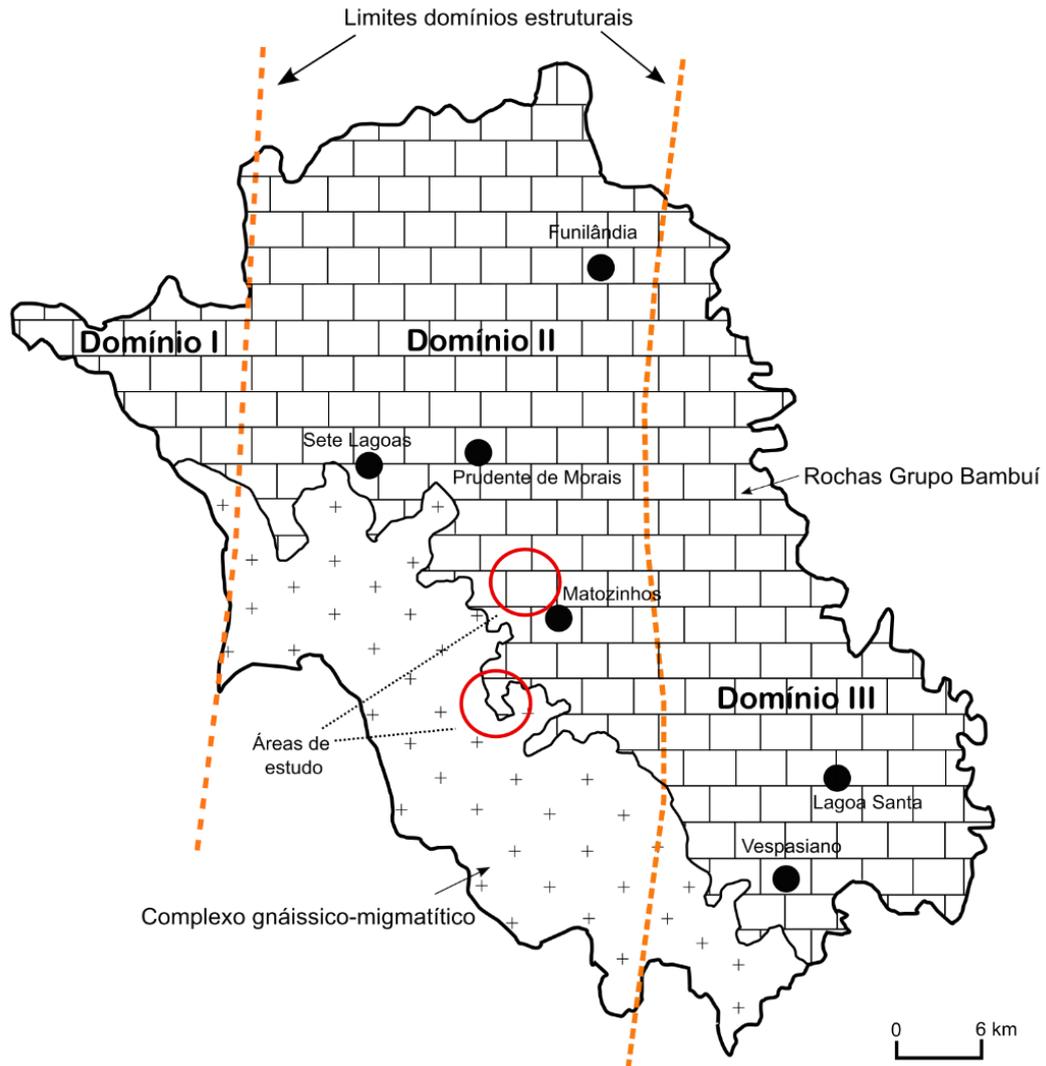


Figura 24 – Distribuição dos domínios estruturais na região cárstica de Lagoa Santa. Tuller *et al.* (1994). Adaptado de Piló (1998).

- O Domínio I: Riacho do Campo – assinalado como a região de menor deformação, composto de litofácies da Formação Sete Lagoas e Serra de Santa Helena.
- O Domínio II: Sete Lagoas – representado por litofácies pelito-carbonáticas e, pontualmente, por tectofácies. O grau de deformação transita entre fraco a moderado.
- O Domínio III: Lagoa Santa – constituído por tectofácies. Ressalta-se uma deformação de moderada a intensa.

Sendo assim, as áreas de estudo encontram-se sobre litotipos da Formação Sete Lagoas, Membro Lagoa Santa, onde se destacam calcarenitos e calcissiltitos. Filitos e siltitos da Formação Serra de Santa Helena compõem a sequência supra sedimentar dessa região. Além disso, na outra região de estudo, a Formação Sete Lagoas está em contato abrupto com as rochas do embasamento granito-gnáissico dispostos na borda leste da Faixa Araçuaí. Nessa região, segundo Silva et al. (2003), os litotipos do Grupo Bambuí “escorregam” sobre o embasamento pré-cambriano. De acordo com a CPRM (2014) (Figura 25), a rocha típica desse complexo é a biotita gnaisse bandado grosseiro, constituído de quartzo, plagioclásio sódico, feldspato(K), biotita e, frequentemente, hornblenda nas bandas máficas. Na região onde estão localizadas as áreas de estudo, os gnaisses biotíticos se tornam um mais leucocráticos, podendo conter muscovita, apresentando algumas vezes níveis muito milonitizados.

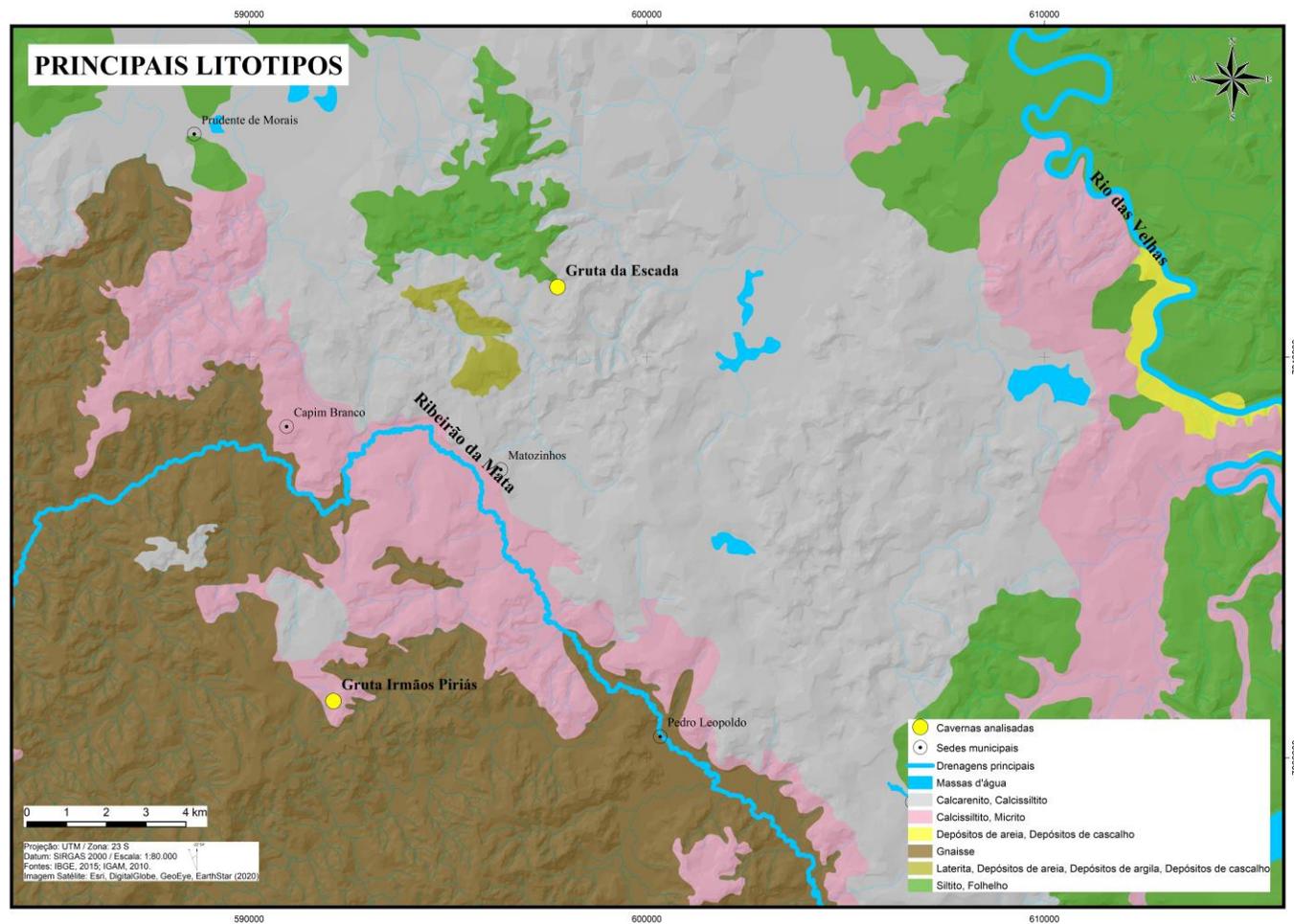


Figura 25 – Principais litotipos para região de estudo. Fonte: CPRM, 2014 (escala: 1:1.000.000).

## 2.5. Geomorfologia

### 2.5.1. O carste superficial

De maneira geral, segundo Bögli (1980), o conjunto morfológico superficial do carste pode contrair multiplicidades de tipos devido a inúmeras variáveis que se combinam na conformação do modelado. No entanto, é possível identificar formas características, onde dolinas, poljes, maciços rochosos, lapiás (karren), vales cegos e recuados têm destaque (Figura 26).

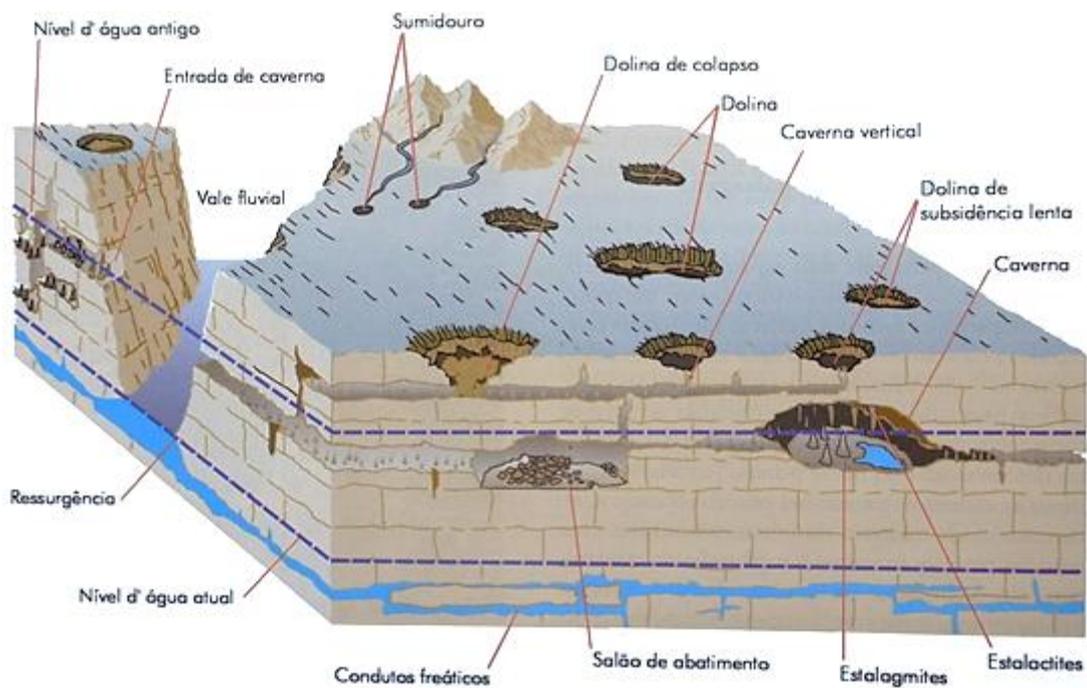


Figura 26 – Bloco diagrama evidenciando os principais componentes do carste. Adaptado de Karmann, 2000.

A paisagem cárstica é caracterizada segundo White (1988), por depressões fechadas de vários tamanhos e arranjos; drenagens descontínuas em superfície, e cavernas e sistemas de drenagens subterrâneas. Ele afirma que o grau de desenvolvimento destas formas de relevo varia de uma região para outra. Alguns terrenos cársticos são um conjunto de formas rugosas composto de depressões profundas, torres isoladas e colunas pontiagudas. Outras podem ser planos suaves,

recobertas com solo, com talvez apenas delicadas depressões que as denominem carste (WHITE, 1988).

Os processos ligados à morfologia cárstica, ainda segundo White (1988), que criam “assinaturas” na paisagem, estão relacionados à necessidade do transporte de massa em solução ser mais representativo do que o transporte por outros processos. Contudo, Piló (2000) argumenta que no processo de morfogênese, esses mecanismos são descontínuos e de difícil mensuração e que o domínio externo é marcado por formas superficiais geradas especialmente pelo ataque químico de águas meteóricas aciduladas sobre rochas carbonáticas. A superfície adquire morfologias típicas como cones e torres, dolinas e cockpits, desfiladeiros, cavernas meândricas, pontes naturais, vales cegos e semicegos, vales secos, uvalas, poljes, sumidouros, nascentes e ressurgências, karren ou lapiás, tufas e travertinos.

Sobre estes contornos impressos sobre tal paisagem, as formas residuais observadas no relevo, como paredões, maciços, torres e cones de blocos, são “feições reliquias” dos processos de dissolução diferencial da rocha (Piló, 1998).

Baseado em menções acerca da compartimentação da paisagem no carste de Lagoa Santa, Auler (1988) indica ausência de tectônica e camadas horizontalizadas, propondo então quatro unidades fisiográficas: planícies fluviais, terraços e rampas coluviais; superfícies sobre filito; planalto cárstico e a depressão do Mocambeiro. Destacam-se os planaltos cársticos (NE Matozinhos e W Lagoa Sumidouro) (Figura 30) com alto grau de carstificação e as dolinas, assinaladas como predominantemente de dissolução.

Da mesma maneira, Kohler (1989) distingue quatro unidades fisiográficas diferentes e sequenciadas, propondo a compartimentação geomorfológica da região em: Desfiladeiros e Abismos com Altos Paredões (Figura 28); Cinturão de Ouvalas; Planalto de Dolinas; e Planícies Cársticas (poljés) (Figura 27), compreendendo área da serra dos Ferradores rumo ao Rio das Velhas. A localização da área onde se encontra a unidade dos Desfiladeiros associada pelo autor à Superfície Sul-americana ocorre a NE de Matozinhos, onde se instala o fluviocarste do córrego Palmeira-Mocambo, caracterizado por paredões imponentes, lapiás e dolinas de abatimento.

Após demonstrar o alto grau de desenvolvimento das feições morfológicas no carste Lagoa Santa, Auler (1994) o redefiniu em seis os domínios fisiográficos (Figura

29), sendo eles: Superfícies Filíticas; Depressão de Mocambeiro; Superfícies de Carste Coberto; Planalto Cárstico; Ígneo e Metamórfico; e Planícies Fluviais.



Figura 27 – Depressão de Mocambeiro, Matozinhos. Ao centro lagoas sazonais e lateralmente, afloramentos recobertos por vegetação densa. Fonte: Rosário, 2011.



Figura 28 – Paredão calcário associado à Gruta de Poções. No topo solo e vegetação instalada. Fonte: Piló, 2003.

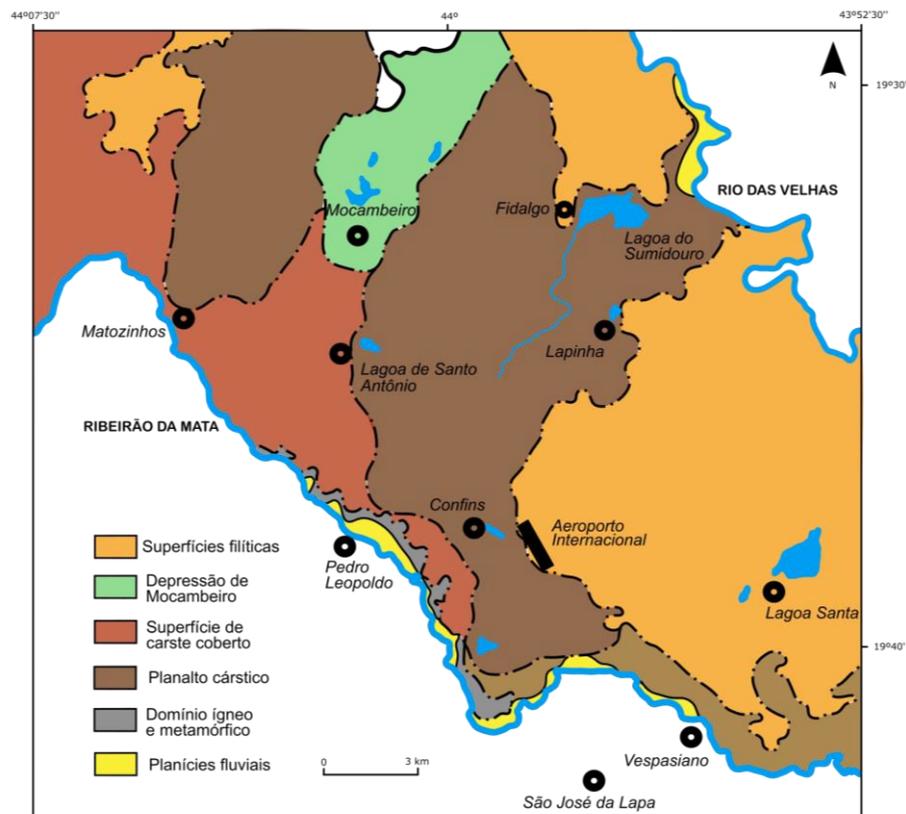


Figura 29 – Domínio fisiográficos proposto por Auler, 1994. Adaptado de Auler, 1994.

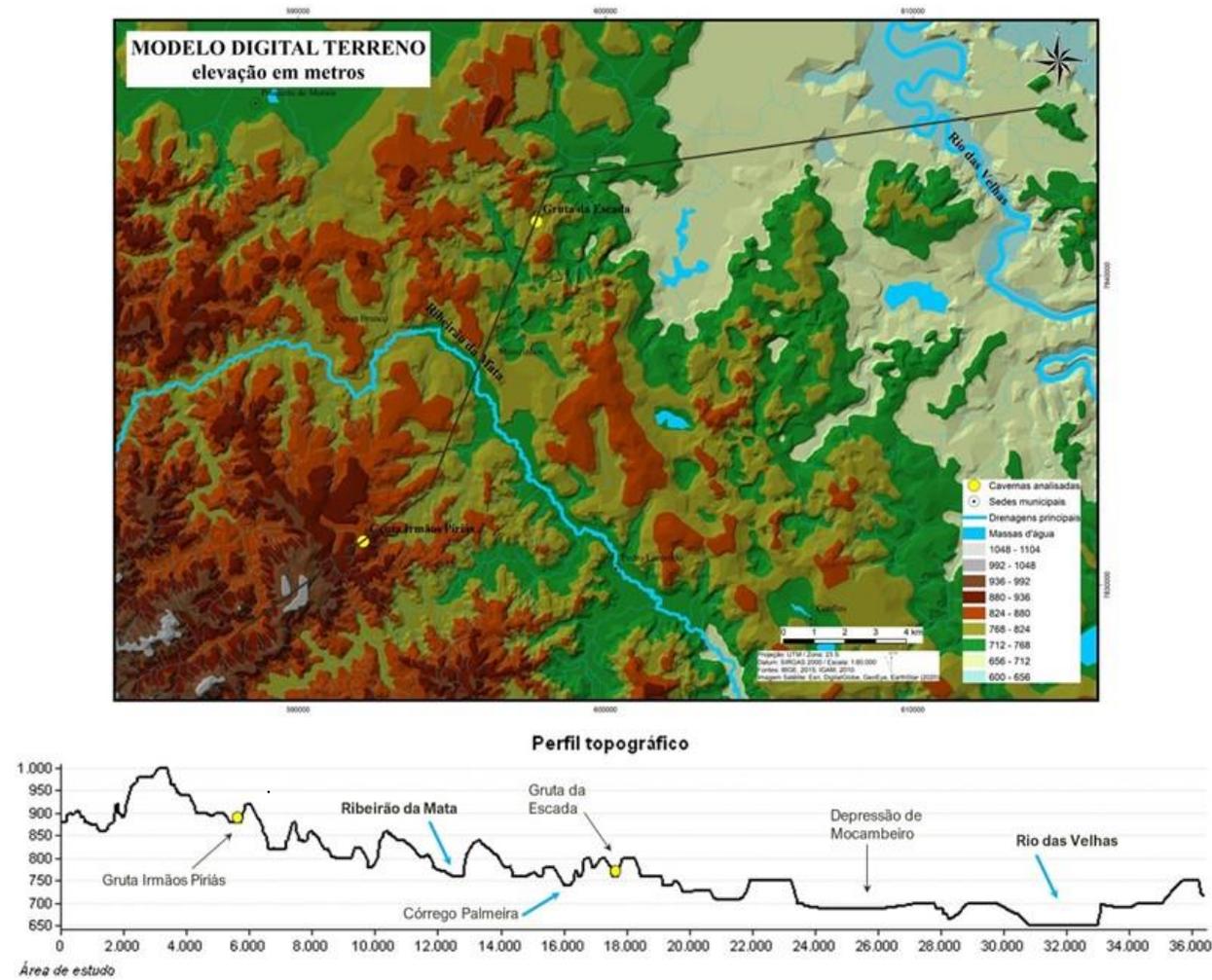


Figura 30 – Modelo digital de elevação para as áreas de estudo e perfil topográfico com indicação das cavernas estudadas e principais drenagens superficiais. Curvas de nível 30 metros (SRTM, 2019).

### 2.5.1. O carste subterrâneo

O carste subterrâneo da região possui mais de 500 cavernas registradas (Figura 31) de acordo com o Canie/CECAV (2021), as quais, de modo geral, correspondem hipoteticamente a breves seções de sistemas paragenéticos antigos mais extensos que foram revelados ou segmentados por rebaixamento de dolinas e do nível de base geral (AULER *et al.*, 2015). O padrão típico dessas cavernas é o labirinto anastomótico, concebido por cânions com níveis de sedimentos e ausência de espeleotemas com atividade hídrica.

Corroborando com tal hipótese, Piló (1998) argumenta que devido a espessa cobertura pedológica, as galerias das cavernas da região exibem-se colmatadas por sedimentos alóctones evidenciando disposições morfo-sedimentares paragenéticas (Renault, 1968) no desenvolvimento do endocarste. Este autor também salienta que, em carstes cobertos por solos, a água que circula no epicarste tende a alargar a porosidade secundária da rocha solúvel que poderá evoluir para um sistema de drenagem subterrânea. Piló (1998) ainda assinala que são as depressões fechadas os pontos de maior fluxo hídrico para o endocarste, com a introdução de material da cobertura superficial para o meio subterrâneo (Figura 26).

Quanto à morfologia em planta das cavernas da região investigada, um bom exemplo está nos estudos desenvolvidos na Gruta do Baú e Macacos, onde Piló (1998) constatou que as cavernas analisadas apresentam padrão reticular – labiríntico – assinalado pela gênese simultânea de diversas aberturas competitivas. Para isso, Palmer (1991) aponta que haveria: (1) baixas taxas de saturação, como em cavernas expostas a inundações; (2) recarga uniforme diante da abertura de muitas fissuras; ou (3) fabricação constante de agressividade no alargamento de fissuras.

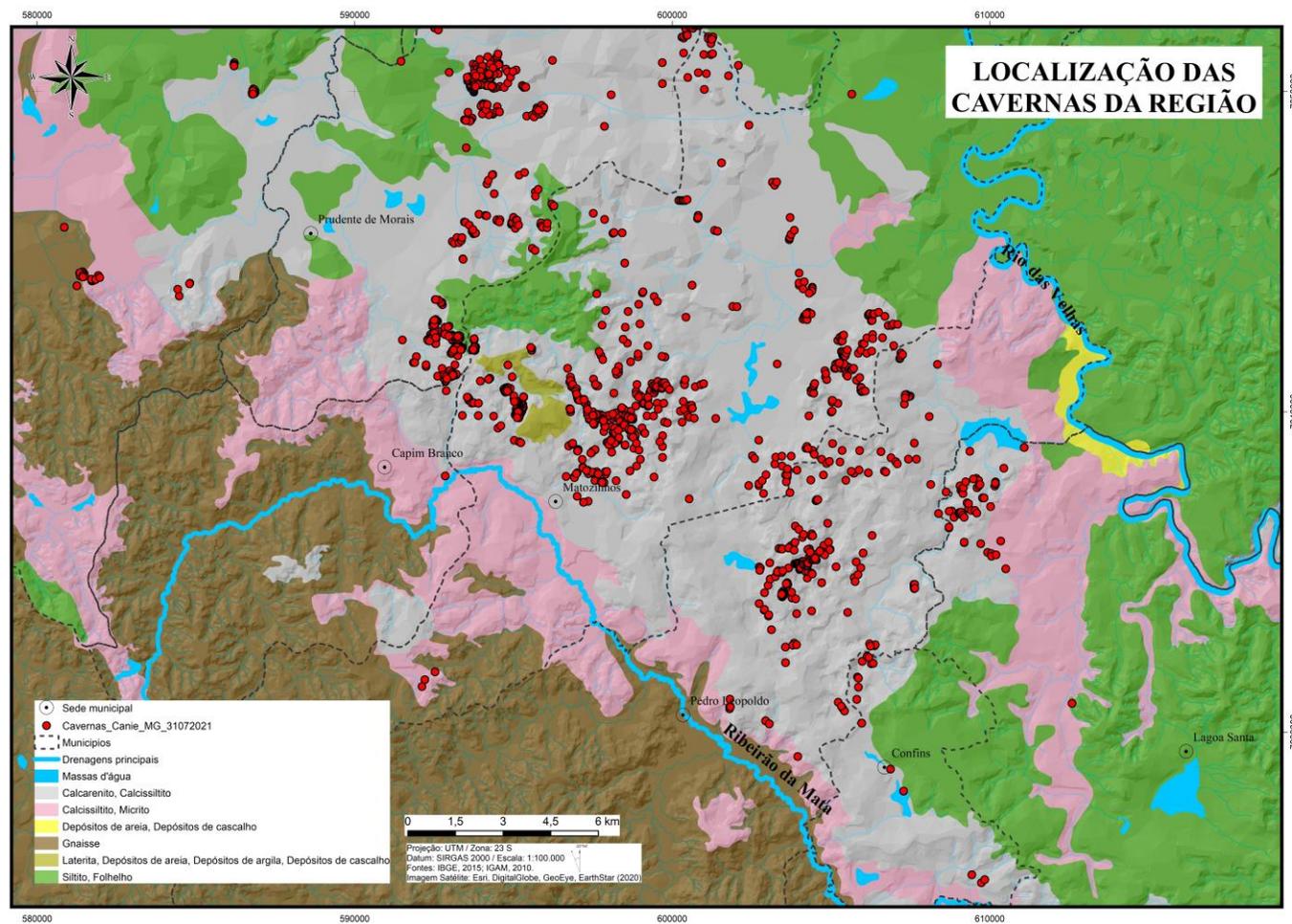


Figura 31 – Mapa exibindo concentrações de cavernas na região cárstica de Lagoa Santa. Fonte: Canie/ICMBio/Cecav, 2021.

## 2.6. Solos

Apesar da maior parte da cobertura pedológica não ser considerada como a zona de interface entre o carste superficial e o subterrâneo ou zona epicárstica, os solos compõem e exercem influência direta na introdução de material sedimentar na rede de condutos subterrâneos, associado ao controle da circulação hídrica.

Quanto aos solos, as primeiras interpretações sobre seus aspectos para região do carste de Lagoa Santa foram elaboradas por Lund, ainda no século XIX, que demonstrou que materiais que recobrem as elevações, planícies e vales da região seriam compostos por espessa camada de argila.

Lanari (1909 *apud* Piló, 1998) aponta três formações dominantes e marcantes para região, onde no primeiro depósito os elementos litólicos são quartzosos raros, que desaparecem ou ocorrem em dimensões muito reduzidas, com cimento bastante consistente de cor amarelada. A segunda é composta por uma terra grossa, rubro-escuro, muito permeável, as vezes associada a calcário quartzoso e exibe ter sido depositada por águas correntes. E, a terceira, seriam os depósitos mais recentes formados por uma terra fina, pouco permeável, sem estratificação perceptível, de coloração parda e tons amarelados.

Já na década de 1970, Coutard *et al.* (1978) destacaram que a região se acha recoberta por material intrincado de origem associada a superfícies deposicionais remotas, filitos ricos em veios de quartzo e calcários alterados *in loco*. Kohler (1989) diferenciou três formações superficiais, sendo que as duas primeiras constituiriam unidades desenvolvidas sobre os filitos e a terceira compreenderia a solos de origem lito-carbonática.

Boulet *et al.* (1992), analisando as variações verticais e laterais da cobertura superficial no planalto cárstico da área investigada, propõem que os solos analisados são originados dos filitos, onde a justaposição é conferida ao relevo irregular de um paleocarste elaborado sobre os calcários anteriores à deposição dos materiais, cuja filiação genética eram os filitos.

Posteriormente, estudos elaborados na região por meio da CPRM (1998), classificou os solos encontrados no planalto cárstico da região, como: Podzólico

Vermelho Amarelo Álico; Podzólico Vermelho Escuro Eutrófico; Cambissolo Eutrófico e Latossolo Vermelho Escuro Distrófico (Figura 32).

Quanto a genética dos solos, Boulet *et al.* (1992), Shinzato (1998), Piló (1998), Auler (2009) e Piló e Castro (2019) relacionam a influência do substrato rochoso na formação de solos da região cárstica de Lagoa Santa a uma grande afinidade a metapelitos e filitos composto por siltitos, argilitos e arenitos subordinados pertencentes à formação Serra de Santa Helena.

De modo geral, a intemperização de filito não carbonatado sobre o calcário da região do carste de Lagoa Santa, derivou em sequências de solo espesso (até 50 m) acobertando porção significativa da área (AULER *et al.*, 2009). As sequências não carbonatadas foram praticamente retiradas do sistema, não havendo mais material de origem sujeitos a processos pedogênicos (a geração de solo é limitada). O processo de denudação do relevo, lentamente, expõe as rochas carbonáticas.

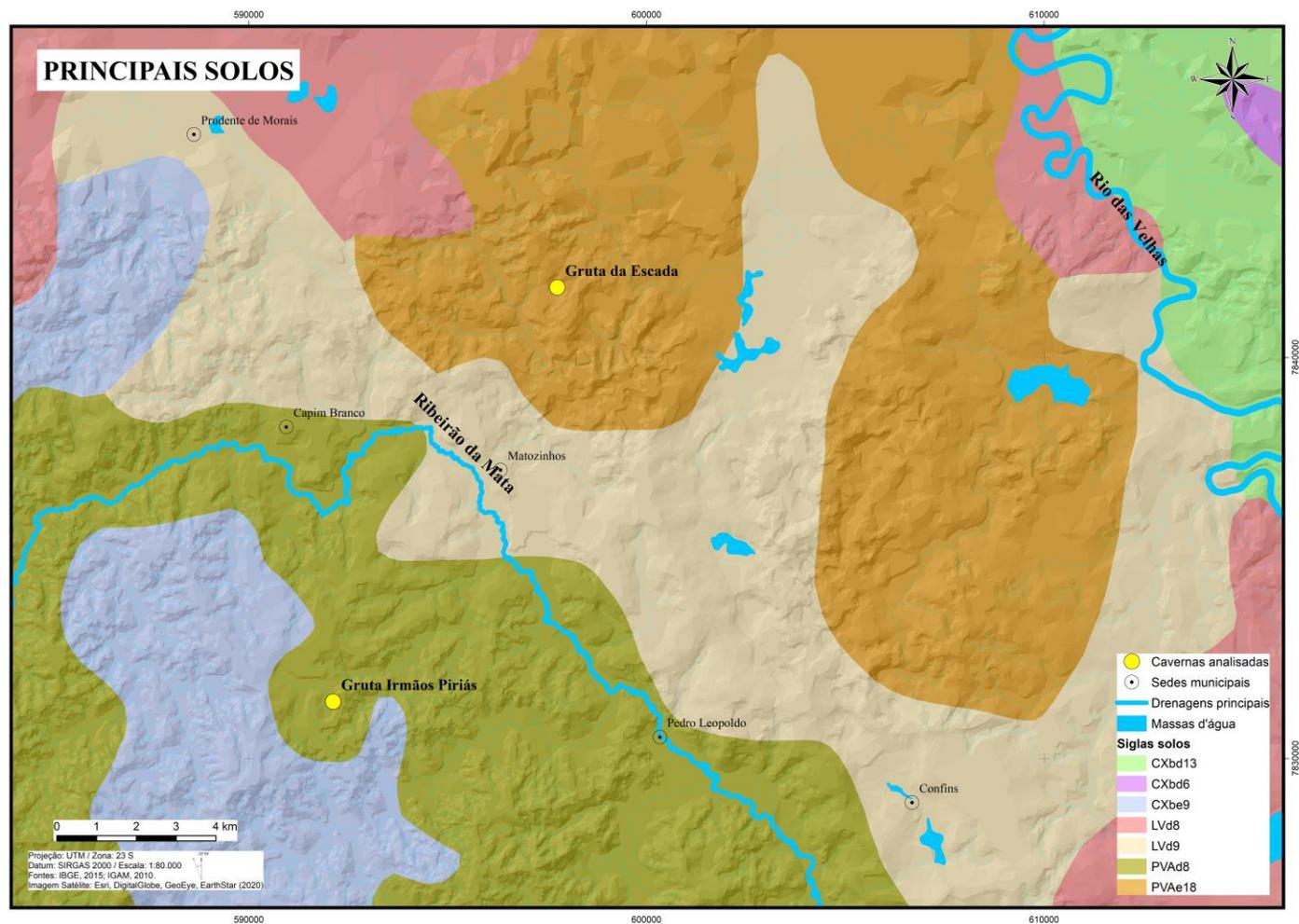


Figura 32 – Mapa de solos da região do carste de Lagoa Santa. Fonte: IEF/SISEMA, 2020. PVAe18 – Podzólico Vermelho-amarelado eutrófico; PVAd8 – Podzólico Vermelho-amarelado distrófico.

### 2.6.1. A interface entre o carste superficial e o subterrâneo

Em geral, a zona de interface entre o carste superficial e o subterrâneo ou epicarste é entendida como a porção superior da rocha subjacente coberta por material inconsolidado, onde encontra-se uma organização de fissuras alargadas por processos cársticos (WILLIAMS, 1985; FORD; WILLIAMS, 1989; PALMER, 1991; PILÓ, 1998).

Na região do carste de Lagoa Santa, Piló (1998), a partir de análises macro e micro morfológicas dos principais horizontes dos solos, propôs um modelo de drenagem interna dos solos nas vertentes: drenagem vertical e rápida nos solos vermelhos em porções mais superficiais e drenagem lateral ao longo da zona de contato rocha-solo, onde prevalecem os solos amarelados (Figura 33). Piló (1998) ainda salienta que essas análises admitem a hipótese de que os solos vermelhos são originados dos amarelados (filiação genética), pois há material semelhante em depósitos endocársticos datados e relíquias de material amarelado dentro de volumes de latossolo vermelho atual.

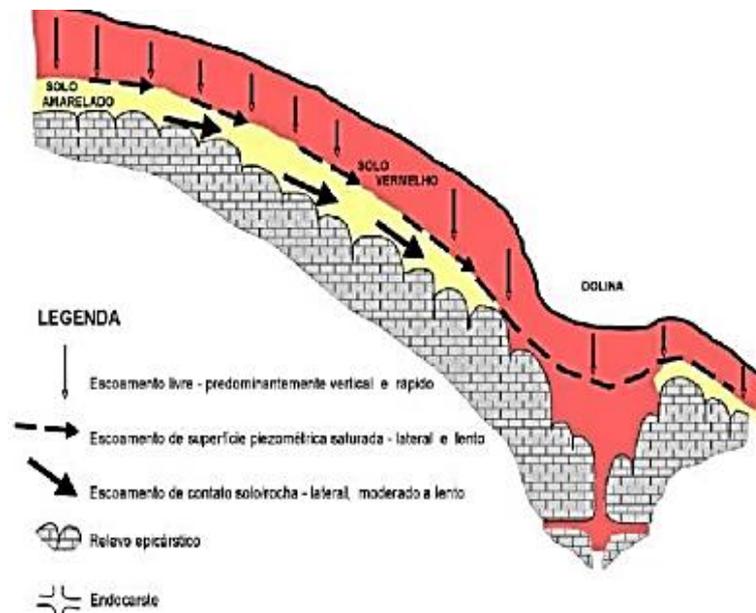


Figura 33 – Esquema de vertente associada a dolina proposto por Piló (1998). Região da Gruta do Baú. Adaptado de Piló, 1998.

Sob o ponto de vista genético, Gillieson (1986) aponta que a camada de solo sobre áreas carbonáticas tem um papel essencial nos processos cársticos, controlando a infiltração e a estocagem de água, como também agindo como um gerador de CO<sub>2</sub>. Ele argumenta que é na região de contato entre a parte basal do solo e a parte superior da rocha, onde a saturação do solo acima dessa rocha acontece em função da baixa capacidade de absorção do endocarste, que se percebe que tal ação permite o fluxo lateral ao longo desse contato, dando origem a uma zona de dissolução rápida no epicarste (WILLIAMS, 1985) (Figura 34, Figura 35).



Figura 34 – Exposição do epicarste em função de movimento de massa. Lapa Vermelha I, Pedro Leopoldo. Fonte: Rosário, 2020.



Figura 35 – Exposição do epicarste em função de movimento de massa, evidenciando entrada de sedimentos. Gruta da Escada, Matozinhos. Fonte: Rosário, 2021.

## 2.7. Clima

Na região do carste de Lagoa Santa e entorno, quanto a temperatura, pode-se afirmar que junho e julho são os meses mais frios do ano, quando as temperaturas médias máximas estão em torno dos 19° C, enquanto as mínimas, giram na casa dos 11° C.

No final de setembro e início do mês de outubro pode ser observado o começo do período chuvoso, no entanto é entre novembro e dezembro que se inicia a formação do excedente hídrico (>500 mm), o qual se mantém até março. O trimestre

dezembro-janeiro-fevereiro é o mais chuvoso, o de maior excedente hídrico e o de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo mais ativo (Figura 36).

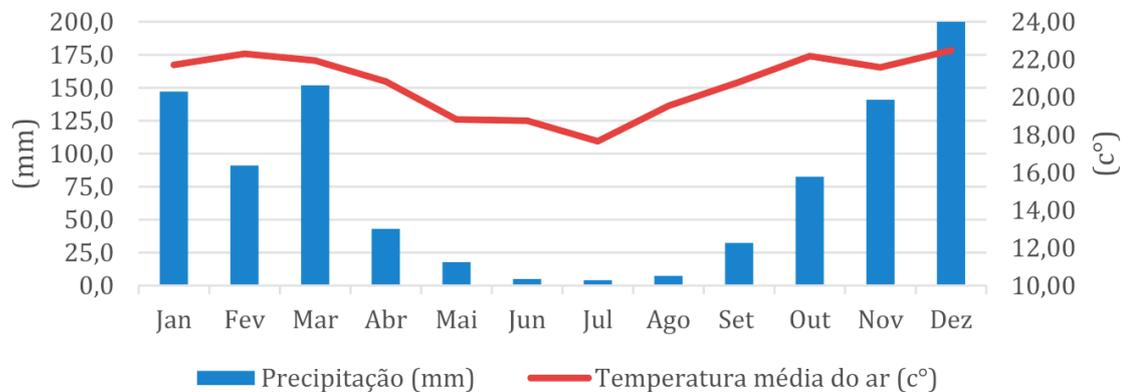


Figura 36 – Média pluviométrica na estação do aeroporto Tancredo Neves. Fonte: Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (2017) in Lott, 2019.

A classificação de Köppen (1972) baseia-se na precipitação e na temperatura média do ar e enquadra a região no tipo climático Aw, ou seja, tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso, uma vez que a temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C e os totais pluviométricos anuais encontram-se em média entre 1.000 e 1.500mm.

Segundo a classificação de Nimer (1977), baseada em critérios adaptados de diversos autores, a região apresenta clima tropical subquente semiúmido, com um período seco de quatro meses, iniciando-se em maio e estendendo-se até agosto.

## 2.8. Vegetação

A região planáltica do carste de Lagoa Santa encontra-se sob a influência de dois domínios fitogeográficos principais: o da mata atlântica e o do cerrado. A vegetação apresenta algumas peculiaridades relacionadas à presença de enclaves de vegetação semelhante à caatinga nas áreas de afloramentos calcários, que seriam, segundo Ab'Saber (1977), originados dos processos de expansão e retração dos climas secos ocorridos durante a evolução quaternária do continente Sul-Americano.

Em geral, podem ser caracterizadas nos seguintes domínios: nas dolinas e arredores dos afloramentos, destaca-se a Floresta Estacional Semidecidual, também

podendo ser designada como mata Mesófila, indicando sua adaptação a um clima sujeito à sazonalidade; alojada sobre e entre os afloramentos calcários, encontra-se a Floresta Estacional Decidual, apresentando mais de 50% dos indivíduos que perdem totalmente as folhas na época de estiagem; o Cerrado ocorre principalmente nas superfícies mais aplainadas com solos mais rasos e/ou mais ácidos e que ocupavam originalmente grandes extensões do carste de Lagoa Santa; nas lagoas perenes ou temporárias ocorre vegetação hidrófila e higrófila, caracterizada por plantas herbáceas ricas em espécies indicadoras de umidade edáfica e/ou dependentes da presença da água em seu ciclo vital.

### **3. Materiais e Métodos**

Partindo do levantamento bibliográfico, análises de campo e laboratório, buscou-se discutir os possíveis processos de entrada de sedimentos em galerias e condutos e sua organização em planta e em perfil no ambiente subterrâneo. Desta maneira, a análise foi realizada em três etapas principais: gabinete, campo e laboratório.

#### **3.1. Gabinete**

##### **3.1.1. Seleção da Amostra**

Após o levantamento bibliográfico e análise inicial, alusivos aos depósitos sedimentares de diversas cavernas da região cárstica de Lagoa Santa, foi delimitada então a amostra a ser investigada. Esta análise de dados publicados também serviu para subsidiar às discussões sobre os depósitos investigados. Os critérios para definição da amostra dos depósitos foram norteados por parâmetros como: unidade geológica, compartimentação geomorfológica, bacia hidrográfica, ambiente com influência fluvial, lacustre e vadoso, e depósitos com sedimentos clásticos passíveis de análise.

Além disso, devido a questões fundiárias locais e a atual crise sanitária, a permissão para a entrada nas áreas onde estão localizadas algumas cavernas

selecionadas inicialmente foi negada. Diante disso, restringiu-se significativamente o número de cavernas passíveis de investigação e, conseqüentemente, a quantidade de depósitos analisados.

Por fim, foram então selecionados os depósitos acomodados nas galerias das Grutas da Escada e Irmãos Piriás (Figura 37), ambas no município de Matozinhos, caracterizados principalmente por restos de preenchimento em paredes.

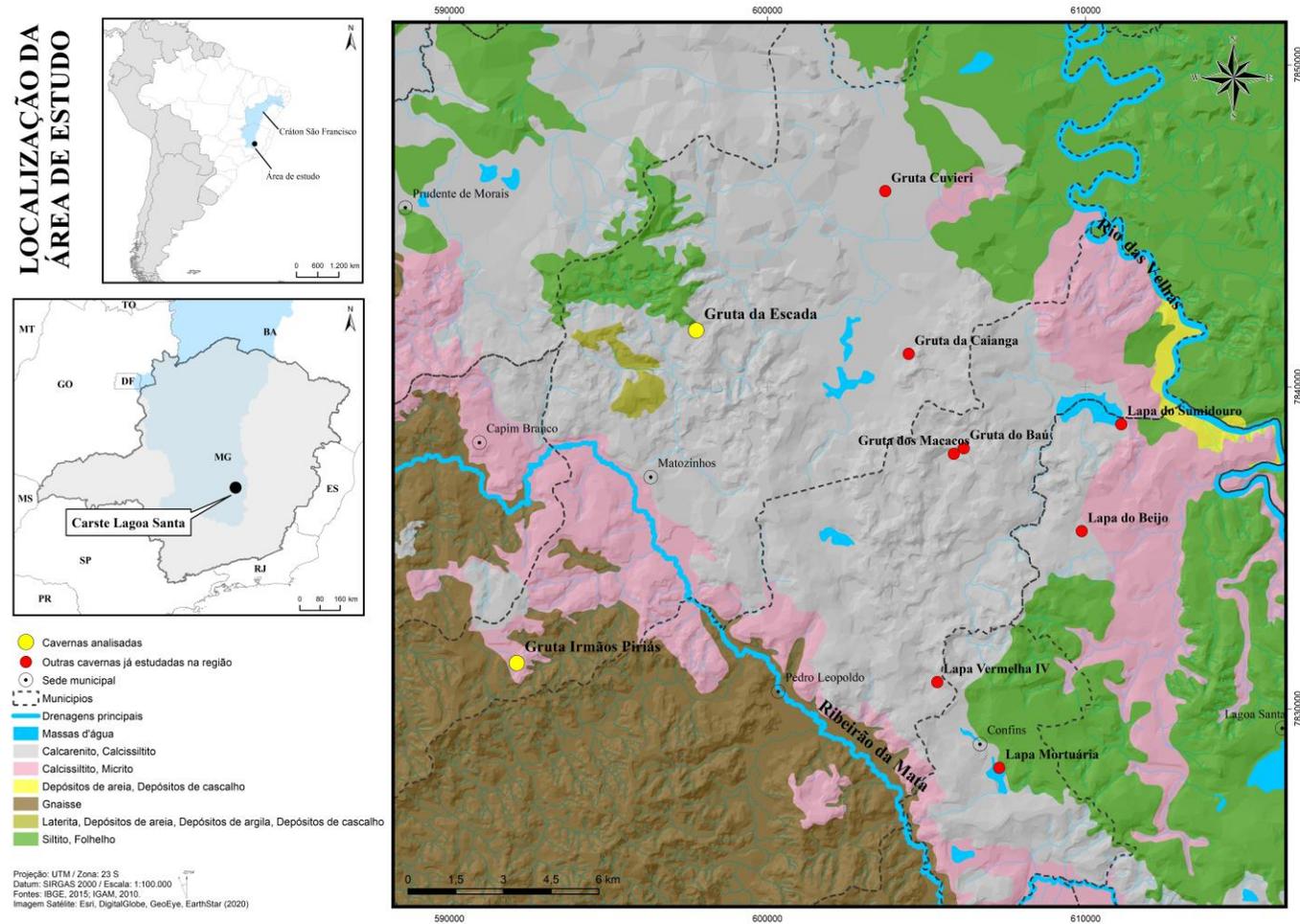


Figura 37 – Localização das Grutas da Escada e Irmãos Piriás (círculos amarelos), e outras cavernas cujos depósitos já foram estudados (círculos vermelhos).

## 3.2. Campo

### 3.2.1. Descrição das Fácies e Estratigrafia

Para elaboração das colunas estratigráficas dos depósitos selecionados foram utilizados métodos para exposição dos sedimentos (“raspagem”), empregando ferramentas manuais como colher de pedreiro, martelo pedológico e pá.

A partir da exposição dos volumes foi realizado controle estratigráfico sistemático, delineando as fácies sedimentares descritivas observadas a partir de definições gerais apresentadas por Suguio (1973) e as dadas por Walker (1992) como: “volume de sedimentos caracterizado por um conjunto de feições (litológicas, estruturas físicas e biológicas) que o difere de outra unidade sedimentar”.

A caracterização dos sedimentos foi baseada na espessura das unidades, contato entre camadas, textura e cor. Os parâmetros utilizados para diferenciar as fácies sedimentares adotados foram:

- estruturas sedimentares singenéticas e epigenéticas, ou seja, as formadas durante ou pouco tempo após a deposição dos sedimentos ou as formadas muito tempo depois da sedimentação (marcas onduladas, gretas de contração, estruturas externas relacionadas a correntes de turbidez e outros mecanismos, concreções, estratificações, natureza do contato, estruturas orgânicas e químicas); as estruturas sedimentares singenéticas e epigenéticas indicam, principalmente, o tempo de formação do depósito;
- morfometria e textura (granulometria, grau de arredondamento, orientação dos clastos) e;
- composição mineralógica (cor dos sedimentos – *Munsell Soil Color Charts*).

Nessa etapa também foi produzido o registro fotográfico dos depósitos/fácies.

### 3.2.2. Ambiente de Deposição

Os mapas espeleotopográficos das cavernas investigadas foram elaborados pelos grupos espeleológico SEE (Sociedade Excursionista Espeleológica de Ouro Preto) e GBPE (Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas), e subsidiaram as interpretações sobre a conexão geoespacial de entrada dos materiais inconsolidados com os depósitos e o ambiente de deposição (rede de galerias). A produção cartográfica de detalhe foi apoiada em croquis em escala feitos em campo e refinados por meio da utilização de softwares como o *CorelDRAW*, *Inkscape*, *ArcMap*, *Survex* e *Compass* em gabinete e plotados na planta baixa das cavernas.

### **3.3. Análises Laboratoriais**

Foram coletadas 20 (vinte) amostras das fácies sedimentares descritas para análises granulométrica e química, nas duas cavernas, sendo 13 (treze) na Gruta da Escada e 7 (sete) na Gruta Irmãos Piriás.

#### **3.3.1. Análise Granulométrica**

Para a análise granulométrica foi utilizado a “Análise Granulométrica (dispersão total) – Método da Pipeta” para obtenção das frações de areia grossa a argila, onde o material sedimentar foi macerado, peneirado em malha de 2mm, pesado, tratado (úmido) e procedido todo o método descrito para obtenção dos percentuais. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia e Recursos Hídricos do IGC (Instituto de Geociências) da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).

De acordo com Suguio (1973), o tamanho dos grãos e sua forma relacionam-se com o meio de transporte, distância e velocidade e a textura pode fornecer informações sobre o processo de transporte e as condições iniciais de sedimentação.

#### **3.3.2. Análise Química**

A análise dos elementos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  (e Perda ao Fogo) foi realizada nas vinte amostras por Fluorescência de

Raios-X, no Laboratório da SGS-Geosol Ltda (XRF e LOI). As amostras foram maceradas com auxílio do moinho de aço e em seguida digeridas por fusão de tetraborato de lítio e realizada a análise quantitativa dos dez principais óxidos (%). De acordo com Suguio (1973), a composição mineralógica indica possíveis rochas fontes e mudanças pós-deposicionais.

## **4. Resultados**

Os resultados dos dados levantados em campo e das análises em laboratório serão apresentados a seguir: descrição das fácies sedimentares, ambiente de deposição, granulometria, grau de arredondamento e química.

### **4.1. Descrição das Fácies**

A análise dos registros sedimentares das Grutas da Escada e Irmãos Piriás foi baseada em seis colunas estratigráficas de seis seções morfo-sedimentares elaboradas, três em cada caverna (Figura 38 e Figura 50), onde topograficamente, na Gruta da Escada a seção mais elevada é a 3, depois 2 e 1 e na Gruta Irmãos Piriás a seção 1 é mais elevada que as seções 2 e 3 – mesmo nível.

Sendo assim, subsidiado pelos dados contraídos da análise dos sedimentos das cavernas, foi realizada a associação e a individualização, ou seja, sedimentos que possuem variação restrita de relações entre si (LAUREANO, 1998), de onze fácies na Gruta da Escada e cinco fácies na Gruta Irmãos Piriás.

#### **4.1.1. Gruta da Escada**

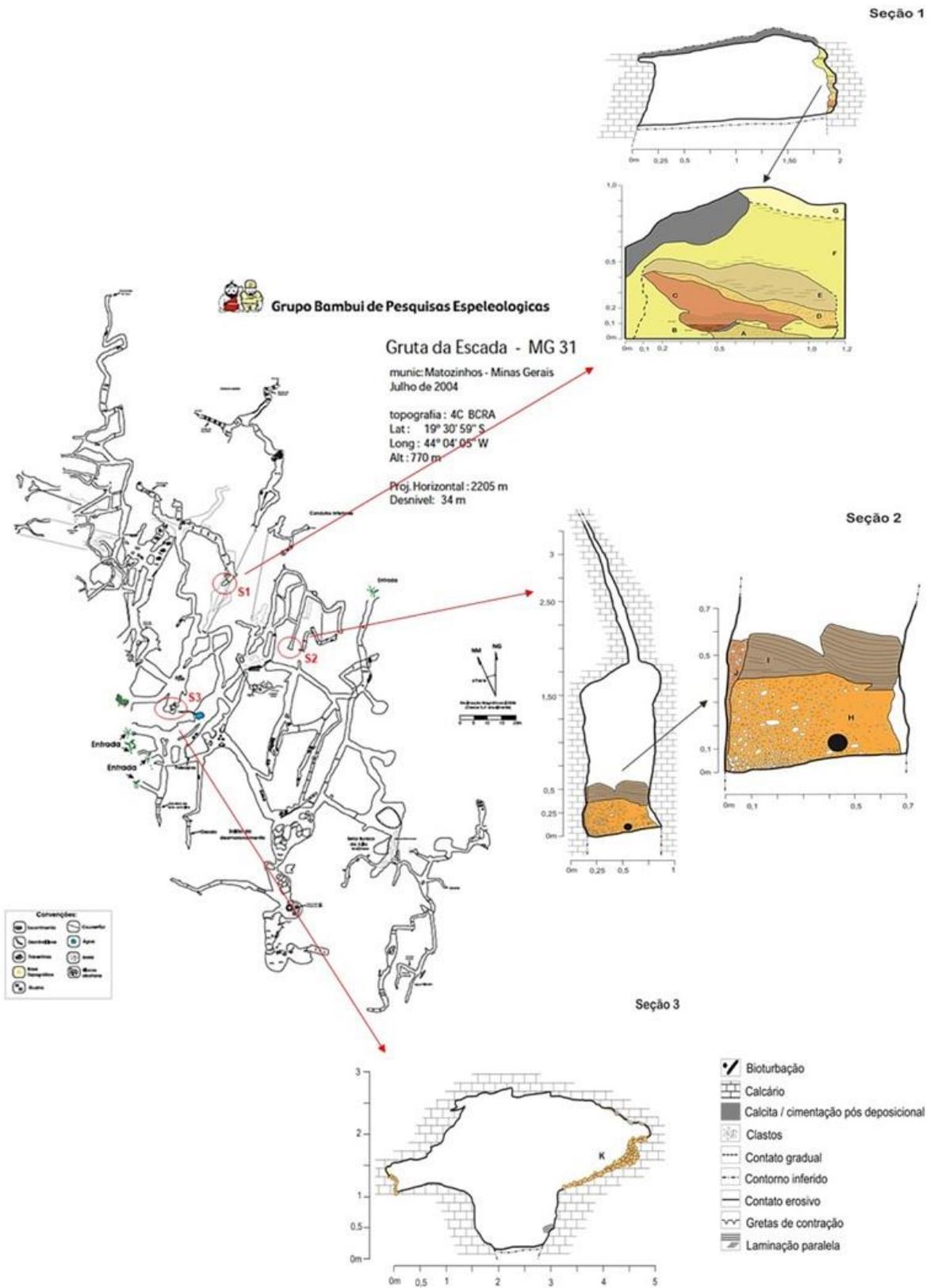


Figura 38 – Planta baixa da caverna, seções morfo-sedimentares, seções estratigráficas e delimitação das fácies – seção 1, seção 2 e seção 3. Gruta da Escada.

#### 4.1.1.1. Seção 1 – Coluna 1

Fácies A – essa fácies foi identificada na seção 01, na base da coluna 01 em sua porção central, e é constituída por lama arenosa de cor amarela acastanhada (10YR 6/8), de consistência macia e não cimentada (Figura 40). De textura argiloarenosa, possui clastos de quartzo, ferro e manganês com tamanho até grânulo, arredondados a subarredondados. O contato com a fácies B é abrupto. No topo desta fácies, na porção noroeste em contato com a fácies C, há ligeira cimentação localizada.

Fácies B – esta fácies identificada na seção 01, coluna 01, perfaz as extremidades e porção central da coluna e caracteriza-se por lama maciça, com baixa porosidade e consistência dura, mas sem cimentação por carbonato de cálcio; possui cor amarela acastanhada (10YR 6/8). A textura é argilosiltosa, apresentando pontos milimétricos pretos, aparentemente relacionados à concentração de ferro em função de regimes de oxidação e redução. Há gretas de contração preenchidas por material da fácies superior; o contato com as fácies superior e inferior é abrupto.

Fácies C – essa fácies é representada por lama com laminações plano paralelas e há seleção de clastos onde, na porção superior, é maior o percentual de areia fina em relação a inferior mais argilosa e laminada. Fragmentos de pelitos tamanho areia a grânulo foram observados. Sua cor na porção superior é vermelho amarelado (5YR 5/8), de consistência macia e baixa porosidade, decrescendo num degradê até um amarelo avermelhado (7.5YR 7/6) de consistência muito dura (não cimentada) e de baixa porosidade. Os contatos entre as fácies superior e inferior são abruptos, onde na porção inferior o sedimento penetra em gretas de dilatação presentes na fácies B. Essa fácies, a C, possui morfologia lenticular (Figura 39) com leve inclinação sentido leste da coluna estratigráfica e, na base, morfologia que remete a um paleo-canal.

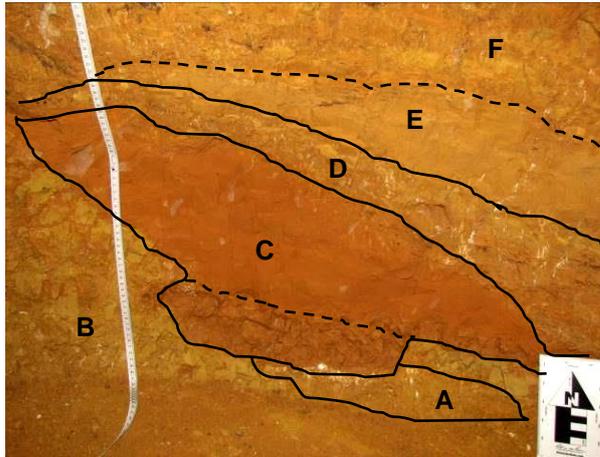


Figura 39 – Detalhe das fácies e diferença de cor.

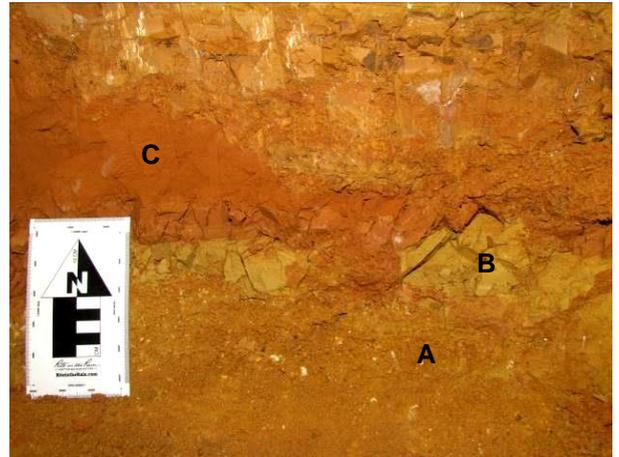


Figura 40 – Material argiloso associado a base de um paleo canal e penetração de sedimentos.

Fácies D – é constituída por uma lama arenosa, com presença de areia grossa em pequenas estruturas de agregados (granular) concentradas na porção leste desta fácies, mal selecionada, de cor amarelo avermelhado (7.5YR 6/8) e consistência macia com raros nódulos duros de manganês e ferro, além de clastos de quartzo e metapelitos tamanho areia a grânulo. Ambos os contatos entre as fácies superior e inferior são abruptos, com mergulho concordante ao da fácies inferior. Gretas de contração foram observadas na porção centro leste dessa fácies. Seguindo sentido oeste ao aclave dessa fácies, os sedimentos vão se misturando, de forma delgada, até o contato com a fácies lateral.

Fácies E – essa fácies é constituída por uma lama silto argilosa, de cor amarelo acastanhado (10YR 6/6), de estrutura maciça e consistência macia, com discreta laminação na porção superior próximo ao contato com a fácies acima, onde na intercalação entre as camadas estão presentes finos níveis de argila alaranjada. O contato inferior é ligeiramente abrupto. Essa fácies também sofre influência das inferiores, apresentando ligeiro mergulho sentido leste. Outra característica dessa fácies é o afunilamento em suas extremidades, denotando morfologia lenticular.

Fácies F – representada por lama siltosa, essa fácies possui cor marrom amarelado (10YR 5/8) com manchas pretas concentradas na porção central, evidenciando mobilização e reorganização do ferro num ambiente redutor e oxidante. Apresenta consistência muito dura, maciça, no entanto, não foi percebida cimentação

por calcita. Há presença de estruturas laminares junto a base dessa camada, no contato com a fácies inferior. A transição com a fácies lateral é de forma gradual e com a superior por meio de estruturas laminares paralelas.

Fácies G – essa fácies é constituída por lama argilosiltosa de cor vermelho claro (2.5Y 6/8), com milimétricos pontos pretos não organizados, de estrutura maciça e consistência muito dura. Está posicionada na porção superior da coluna, em contato com o teto da galeria (Figura 41), e na porção inferior o contato com a fácies é marcado por estruturas plano paralelas (laminações). À medida que se avança da base em direção a porção superior desse nível, o sedimento torna-se cada vez mais cimentado (muito duro) pela calcita. Esse cimento também reveste as porções laterais dessa fácies (Figura 42).



Figura 41 – Conduto onde é observado o depósito investigado.



Figura 42 – Resto de preenchimento na porção distal do conduto. As laterais encontram-se extremamente cimentadas.

#### 4.1.1.2. Seção 2 – Coluna 2

Fácies H – essa fácies é composta por lama argiloarenosa, com clastos e nódulos de argila tamanho grânulo a areia fina, além de seixos de quartzo angulares, subangulares e arredondados, e fragmentos de calcário e metapelitos (grânulo) (Figura 44). Na porção oeste desta fácies percebe-se ligeira seleção dos clastos, na base. Possui cor variando do marrom escuro (7.5YR 5/6) na poção central ao amarelo avermelhado (7YR 6/6), apresentando consistência alternando de solta, na porção

central, à macia na porção leste da fácies. Quanto ao contato com a fácies superior, esse é feito de forma abrupta. Também há uma cavidade junto a base desta fácies, possivelmente relacionada a atividade biológica.

Fácies I – é caracterizada por lama laminada com clastos de quartzo, calcário e metapelito tamanho areia à grânulo, localizados pontualmente, arredondados à subarredondados. Essa laminação, na porção leste, apresenta convexidade e leve mergulho leste até o contato com a parede e no centro, descontinuidade esta possivelmente ligada ao recuo do nível d'água (Figura 43). Possui cor amarelo avermelhado (7.5YR 6/8), maciça, e consistência muito dura. O contato com a fácies superior e lateral é abrupto.

Fácies J – essa fácies caracteriza-se por uma lama arenosa, com pequenos nódulos duros de argila, fragmentos de espeleotemas (grânulo) e clastos de quartzo tamanho areia a grânulo angulares a subangulares, além de pequeno fragmento de osso de fauna (Figura 45). Possui consistência preenchendo greta de dilatação no contato com a parede oeste da seção, seccionando todas as fácies, onde o contato é abrupto.



Figura 43 – Vista parcial do conduto e depósito ao fundo.

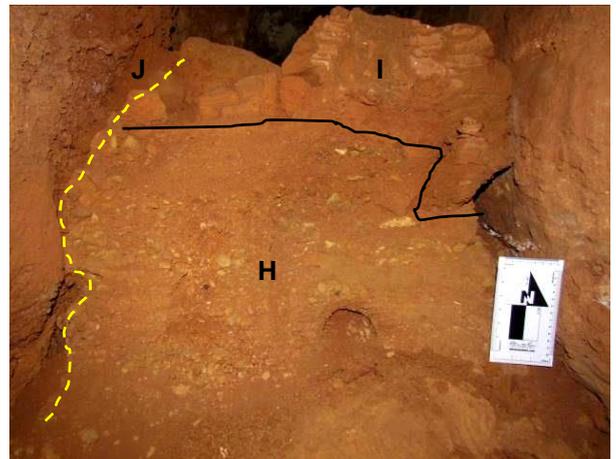


Figura 44 – Detalhe do depósito: duas fácies bem diferenciadas – H e I.



Figura 45 – Detalhe da fácies H em contato com a J.

#### 4.1.1.3. Seção 3 – Coluna 3

Fácies K - Essa seção se localiza próximo a uma das entradas da caverna, onde a face leste da galeria encontra-se revestida por clastos de quartzo angulares e subangulares cujo tamanho varia de seixo a calhau (Figura 46). Essa fácies é constituída por brecha de clastos matriz suportada (Figura 49), onde na base e porção central dominam clastos de quartzo e na porção superior, além de clastos de quartzo, matriz amarelo avermelhada e clastos de calcário subarredondados cimentados (Figura 47). Manchas pretas e nódulos duros de argila foram notados. Esse conjunto de material clástico (Figura 48) não apresenta organização aparente e o contato com o teto apresenta mais material argiloso cimentado.



Figura 46 – Vista parcial da seção 03. O pontilhado mostra a posição da representação da seção.



Figura 48 – Morfologia do depósito – fácies K.

Figura 47 – Clastos de quartzo e calcário cimentados por carbonato de cálcio.



Figura 49 – Tamanho e grau de arredondamento dos clastos de quartzo.

#### 4.1.2. Gruta Irmãos Piriás



#### 4.1.2.1. Seção 1 – Coluna 1

D – os sedimentos descritos nessa coluna encontram-se a aproximadamente 4 metros de altura (Figura 51) em relação ao piso atual da caverna e esta fácies é caracterizada por lama argilosa com clastos tamanho grânulo e areia de quartzo, ferro e fragmentos de rocha pelítica, pontuais, com discreta laminação (águas estagnadas) (Figura 52). Esse sedimento é, possivelmente, a matriz que suporta os clastos da fácies superior/inferior depositada. A matriz é de cor amarelada (2.5Y 6/8) e consistência solta. Na porção superior da coluna esta volta a aparecer, com laminações intercaladas com níveis escurecidos e endurecidos por ferro. O contato não é claro (gradual).

Fácies E – essa fácies é constituída por uma brecha de clastos matriz suportada, onde os clastos são representados por quartzo angulares à arredondados, imbricados, alguns verticalizados, de forma organizada (Figura 53). A matriz que cimenta esses clastos é de cor amarelada presentes na fácies superior e inferior, mas, à medida que se vai em direção ao topo dessa fácies, a concentração de ferro aumenta tornando-a escura, inclusive envolvendo os clastos de quartzo e promovendo o contato com a fácies inferior. Consistência muito dura; cimentado. Há o crescimento de espeleotema (escorrimento) sobre esse depósito, em sua porção leste/nordeste.



Figura 51 – Vista da galeria e posição onde se encontram os depósitos investigados (círculo vermelho).

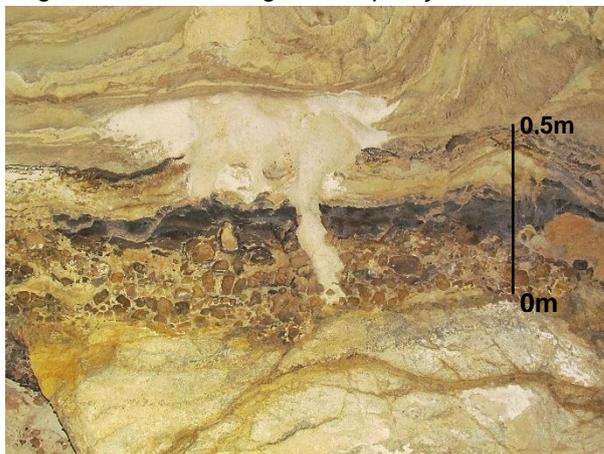


Figura 52 – Vista frontal do depósito investigado.



Figura 53 – Detalhe do depósito: imbricação, seleção e grau de arredondamento. Note depósito químico recobrimento porção do depósito.

#### 4.1.2.2. Seção 2 – Coluna 2

Fácies A – constituída por brecha de clastos matriz suportada, onde esses clastos são subarredondados à arredondados tamanho seixo à calhau sem

organização aparente (Figura 54 e Figura 55). A matriz que reveste estes clastos possui cor amarelada e consistência muito dura, ocasionada pela forte cimentação por cálcio. O contato com a fácies superior é abrupto, onde um nível calcítico embasa a fácies superior.

Fácies B – esta fácies (Figura 56) é representada por lama com laminações plano paralelas que possui, na porção inferior, clastos de quartzo tamanho seixo e calhau localizados pontualmente, e cor marrom pálida (10YR 7/4). Entre essas laminações intercalam material acinzentado, com presença de matéria orgânica. Consistência ligeiramente dura. Na porção central desta fácies um nível calcítico secciona-a e encerra a participação de material clástico. Na porção superior, após o nível calcítico, a fácies possui intensa laminação com diferenciação de cor entre as intercalações dos níveis (amarelo, marrom e cinza), onde as amarela e marrom possuem textura arenosa e a cinza argilosa. De maneira geral, possuem consistência macia e a argila cinza consistência pegajosa, plástica. O contato entre essas diferentes lentes é abrupto e descontínuo lateralmente. Também foi observado vestígios de bioturbação na porção central desta fácies.

Fácies C – esta fácies é concebida por uma lama laminada siltosa, de estrutura maciça, consistência muito plástica e cor marrom muito pálido (10YR 7/3). Está no topo da coluna em contato com o teto da seção, formado por material clástico anguloso a subangulosos cimentados por calcita (Figura 57). O contato com a fácies inferior é feito de forma gradual com diferenciação da seleção do material e cor (ambiente de águas estagnadas).



Figura 54 – Vista frontal da coluna. Na base material clástico cimentado e, na superior, material areno-argiloso disposto em camadas.



Figura 55 – Detalhe da morfologia, tamanho e grau de arredondamento dos clastos da fácies A.



Figura 56 – Nível de transição entre as fácies A e B.

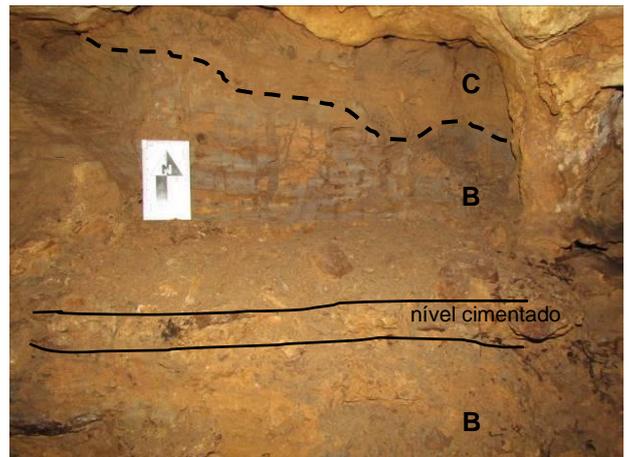


Figura 57 – Fácies B com níveis estratigráficos com variações granulométrica e de cor. Vestígios de bioturbação.

#### 4.1.2.3. Seção 3 – Coluna 3

Fácies B – é constituída por lama laminada siltoarenosa de consistência macia e cor castanho claro acinzentado (10YR 6/2), que também ocorre na seção 2 (Figura 58). Na base dessa fácies há contato com a rocha e um nível com manchas pretas (Figura 59), ferruginosas, possivelmente ocasionados por movimentos de oscilação do freático. Nessa fácies há lentes de sedimentos amarelos (10YR 7/6), alaranjados

e cinzas, onde o alaranjado possui textura arenosa, contribuição de impulsos ou revolvimento de sedimentos autóctones associados a oscilação vertical do NA<sup>2</sup> (acrecção paralela), e os outros, argilosa, num ambiente de menor energia hidráulica. Estas lentes possuem continuidade lateral com leve mergulho de direção leste. O contato com a fácies superior é gradual, marcado por distinção de cor e na base acumulação ferrífera (Figura 60).



Figura 58 – Detalhe da fácies C: níveis amarelados em meio a camadas avermelhadas.



Figura 59 – Detalhe dos níveis da fácies B: camadas amareladas à alaranjadas arenosa entre material argiloso cinza.

Fácies C – essa fácies, também presente na seção 2, estende-se até o teto da seção e é constituída por lama laminada de consistência plástica, muito siltosa, de cor amarela (10YR 8/6), com intercalações de lâminas (níveis) de cor amarelo claro pálido (Figura 61). Diferente dos níveis lenticulares da fácies inferior, essas camadas aqui não possuem continuidade lateral. Por outro lado, da mesma maneira que a fácies superior, possui leve mergulho sentido leste da coluna e seu contato é feito de forma gradual. Algumas cavidades esféricas centimétricas estão presentes, indicando possível bioturbação.

---

<sup>2</sup> NA: nível d'água



Figura 60 – Vista frontal do depósito. Note as manchas pretas na base da coluna.

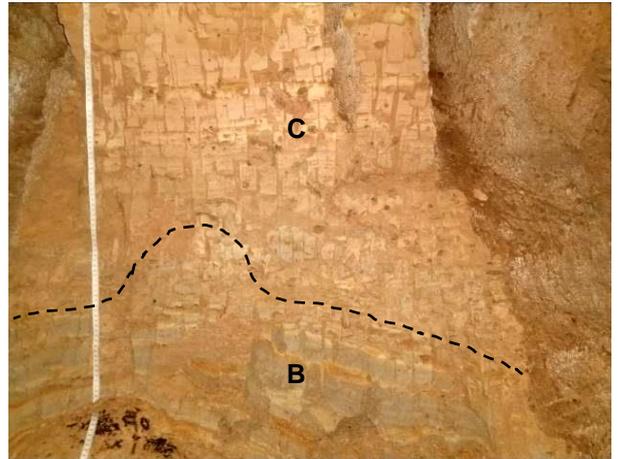


Figura 61 – Coluna expondo duas fácies: B na base com camadas arenosas intercalando material argiloso cinza; e C, argilosa com níveis mais amarelados.

#### 4.1.3. Ambiente de Deposição

As duas cavernas selecionadas para os levantamentos das seções morfo-sedimentares e análises das fácies possuem características distintas entre si quanto ao ambiente de sedimentação. A mais marcante é que a Gruta da Escada está muito acima do nível de base local atual, sendo predominantemente seca, com alguns empoçamentos sazonais provenientes de percolação por fissuras na rocha, remetendo a um paleo carste. Enquanto isso, a Gruta Irmãos Piriás tem influência de um córrego perene, que percola todo seu desenvolvimento, proporcionando ambientes com hidrodinâmicas de turbidez e estagnação. Esses fatos impõem condições distintas para a organização estratigráfica e química dos sedimentos nas galerias das duas cavernas.

Quanto a localização dos depósitos em relação ao desenvolvimento das cavernas, seguiu-se uma ordem, de tal modo que a primeira seção se localiza junto ou próximo as entradas e as demais em porções intermediárias.

Apesar de ambientes díspares, as seções próximas as entradas nas duas cavernas exibem uma brecha clasto suportada, com predomínio de quartzos angulares e subangulares, denotando pouco transporte e importante processo de cimentação pós deposicional. No caso da Gruta da Escada esse depósito preenche a parede e

porção do teto de uma seção com altura média de 2 metros. Na Gruta Irmãos Piriás esse depósito de entrada está a aproximadamente 4 metros de altura em relação ao piso atual, com aproximadamente 50 cm de espessura, onde os clastos exibem certa organização (imbricamento). Essas fácies nas duas cavernas ocupam, topograficamente, o topo das galerias.

O ambiente onde estão localizadas as seções 1 e 2 na Gruta da Escada é caracterizado por estar em porções de final de conduto/galeria, onde na primeira há um nível estalagmítico extenso que sela todos os sedimentos presentes nas fácies descritas, que, no entanto, aparenta ter sido esvaziado mecanicamente (ação antrópica) por mineiros de salitre, atividade comum no período colonial na região ou por paleontólogos. Na segunda seção, um conduto em aclave que se afunila horizontalmente e verticalmente, apresenta marcas de retirada mecânica dos sedimentos, além de atividade biológica. São ambientes com restrições de circulação hídrica proporcionadas pela largura e altura dos condutos, imprimindo condições hidrodinâmicas de baixa energia, como de águas estagnadas com material em suspensão, onde é lenta a deposição de argila, havendo seleção do material.

Na Gruta Irmãos Piriás o ambiente onde estão localizadas as seções 2 e 3 sofre influência direta da oscilação do nível da água do córrego, que episodicamente imprime fluxos turbulentos em períodos de maior precipitação, transportando material em suspensão e como carga de fundo. Por outro lado, em períodos de menor precipitação a quantidade de água reduz drasticamente e impõe menor competência para transporte de sedimentos como carga de fundo, havendo, por outro lado, maior presença de material em suspensão. Dentro dessas oscilações periódicas, momentos em que a galeria se encontra totalmente saturada pela água devido às diferenças morfológicas ao longo do seu desenvolvimento, podem também ofertar um ambiente misto, com atuação de processos erosivos em períodos de maior resposta hidrodinâmica e de deposição desses sedimentos quando de baixa circulação hídrica.

#### 4.1.4. Análises laboratoriais

#### 4.1.4.1. Granulometria

De maneira geral, nas colunas levantadas na Gruta da Escada nota-se grande percentual da fração argila em praticamente todas as fácies e, secundariamente, de silte (Figura 63). Destaca-se aqui a fácies C\* coletada na porção central da coluna 1, em que o percentual de argila atinge quase 70%. As exceções ficam com as fácies E (coluna 1) em que o percentual de argila não alcança 17%, e I (coluna 2) que apresentou os maiores valores percentuais de silte: 57,53% e 51,13%.

Os maiores percentuais de areia estão concentrados nas fácies A, C, E (coluna 1), H e H\* (coluna 2). A fácies basal A possui o maior valor de areia grossa, com mais de 30%, e as fácies H (coletado no centro da fácies) e H\* (coletado na porção leste da fácies) seguem a mesma tendência, com percentuais respectivamente de 19% e 27,36%. Na coluna 1, a fácies C possui o maior valor para a fração areia fina com 31,28%, seguida pela fácies E com 22,98%.

Outro aspecto que merece destaque se trata dos valores percentuais totais baixos das frações areia nas fácies I e J (menores que 10%), que estão topograficamente no topo da sequência sedimentar.

A fácies K não foi alvo da análise granulométrica laboratorial por se tratar de material extremamente cimentado, impossibilitando sua coleta; no entanto, os clastos medidos possuem tamanho seixo a calhau (médio).

Diferentemente dos sedimentos levantados nas seções da Gruta da Escada, nas colunas analisadas na Gruta dos Irmãos Piriás as frações silte e areia fina dominam percentualmente as fácies investigadas (Figura 64). Destaca-se a fácies C tanto na coluna 3 quanto na coluna 2, onde o percentual da fração silte atinge respectivamente 59,29% e 57,075, e a fácies B\* (lente arenosa) na coluna 3, onde a fração areia fina apresenta 46,02%.

Para a fração areia grossa, a fácies E da coluna 1 possui o maior valor percentual com 40,65%, seguida pela fácies D com 21,08%. Por outro lado, na fácies B da coluna 3 a fração areia grossa é quase ausente, com percentual de 0,37%.

A fração argila apresenta distribuição homogênea em todas as fácies levantadas na coluna 3, sendo a exceção a fácies D da coluna 1, onde o valor percentual dessa fração exibe porcentagem de 59,28%.

A fácies A não foi alvo da análise granulométrica laboratorial por se tratar de material extremamente cimentado, impossibilitando sua coleta; no entanto, foram medidos e predominam clastos tamanho seixo à calhau (média).

#### 4.1.4.2. Química

As análises dos principais componentes para os óxidos estão expressas na Figura 62, que exhibe 66,36% de variância que corresponde a 39,45% do primeiro componente (PC1) e 26,91% da segunda componente (PC2).

A análise química dos sedimentos da Gruta da Escada exhibe certa homogeneidade entre as fácies quando considerados critérios granulométricos, estruturais e cor (Figura 63).

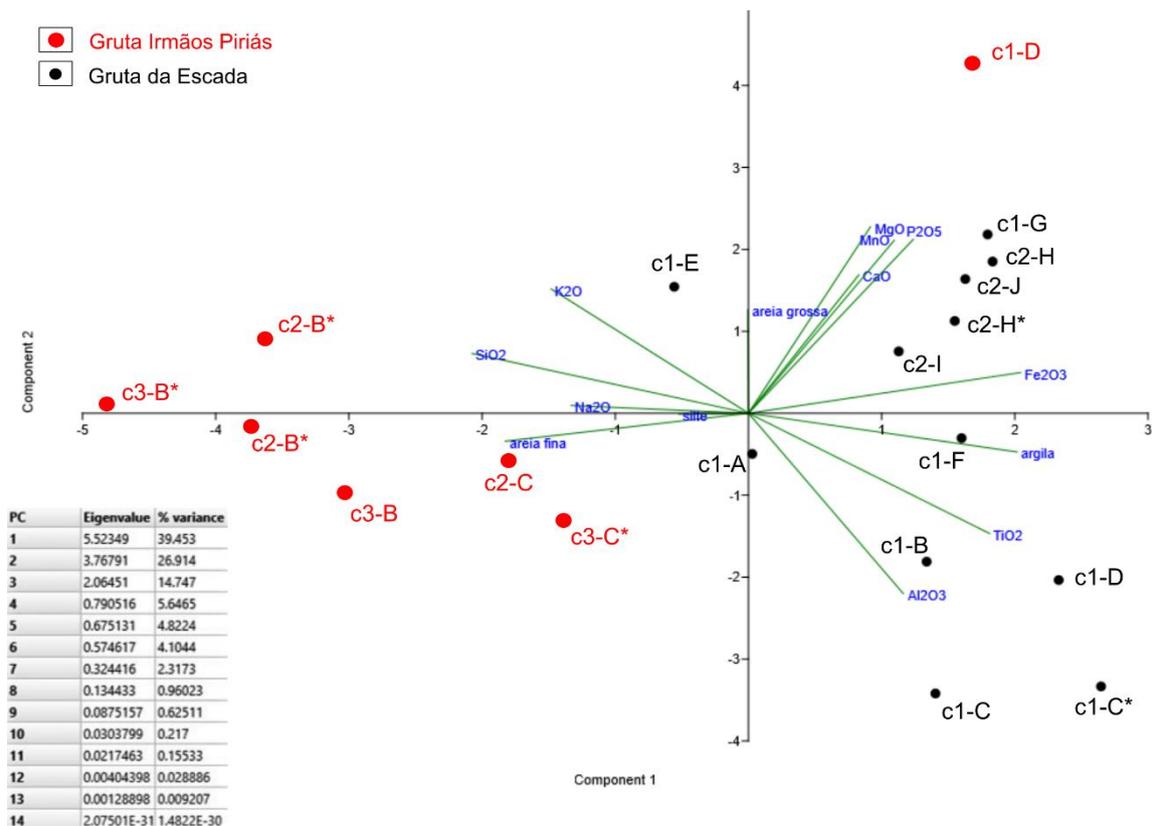


Figura 62 – Resultado da análise dos principais componentes para os óxidos. O percentual do componente de cada variância está no canto esquerdo. c: coluna; A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-: fácies.

As fácies A e E da seção 1/coluna 1, por exemplo, apresentaram os maiores valores percentuais de  $\text{SiO}_2$  (> 50%) e os menores valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (média de 20%), enquanto os valores para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se mantiveram estáveis, próximos a 10%. Além disso, a fácies E apresenta ligeira presença de carbonato de cálcio. A fácies C da seção 1/coluna 1 onde foram coletadas amostras de porções diferentes desta fácies (topo e base) devido a mudança granulométrica observada em campo, possui grande similaridade tanto na porcentagem de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Nas fácies F e F\* (porção de concentração das machas pretas), representadas por lama amarela com manchas pretas, há maior presença de ferro em relação as demais fácies da coluna 1 (15,6%), um decréscimo na porcentagem de sílica, a menor das fácies levantadas e um leve aumento na presença de óxidos de cálcio em relação a fácies E, possivelmente influenciadas pela oxidação e redução do ferro num ambiente com oscilação do nível de água. A fácies G apresenta a maior porcentagem de cálcio em comparação as outras fácies sedimentares analisadas, demonstrando ligeira cimentação. Este fato pode ser explicado pela proximidade com o teto da seção – uma capa estalagmítica. Por outro lado, a menor porcentagem de ferro corrobora com menor influência hídrica, exposições sazonais à oxidação. Quanto as fácies H, H\*, I e J exibem padrões percentuais de sílica, alumínio e ferro muito próximos, e a fácies J maior porcentagem de cálcio em relação a estas. Essa similaridade pode indicar a mesma fonte de sedimentos depositados num ambiente de águas estagnadas. A fácies K não é apresentada na análise por se tratar de uma brecha de clastos de quartzo extremamente dura, no entanto, a matriz que cimenta estes clastos mal selecionados é de cor amarelada, com forte cimentação por calcita.

Na Gruta Irmãos Piriás as fácies associadas B, B\* presentes nas colunas 2 e 3 exibem percentagens relativamente altas de sílica (63% a 69%), alumínio (16,4% a 22%) e ferro (3,5% a 5,2%), com certa homogeneidade. Os altos valores para sílica podem ser imputados ao litotipo, de composição mineralógica com abundância deste mineral (Figura 64). A fácies C, também presente nas duas colunas levantadas, apresentam os menores valores percentuais de sílica (54,1% e 49%) e os maiores valores para alumínio (26,1% e 29,1%), cuja explicação pode estar associada a pouca influência hídrica sobre estes sedimentos entre a fonte de origem e a deposição. A

fácies D, constituída por lama com discretas laminações plano paralelas localizada próximo a entrada da caverna (seção 1), exibe o maior percentual de ferro (13,1%) entre as fácies sedimentares analisadas, contribuindo para o entendimento de que sofreu maior ação da oscilação hídrica. Um fato importante trata-se do baixo percentual de cálcio em todas as fácies levantadas, mas que nesta (S1-FD) apresentou o maior valor (3,05%), sinalizando cimentação pós deposicional. A fácies E não aparece na análise química por se tratar de uma fácies extremamente dura e composta essencialmente por clastos de quartzo cimentados por calcita.

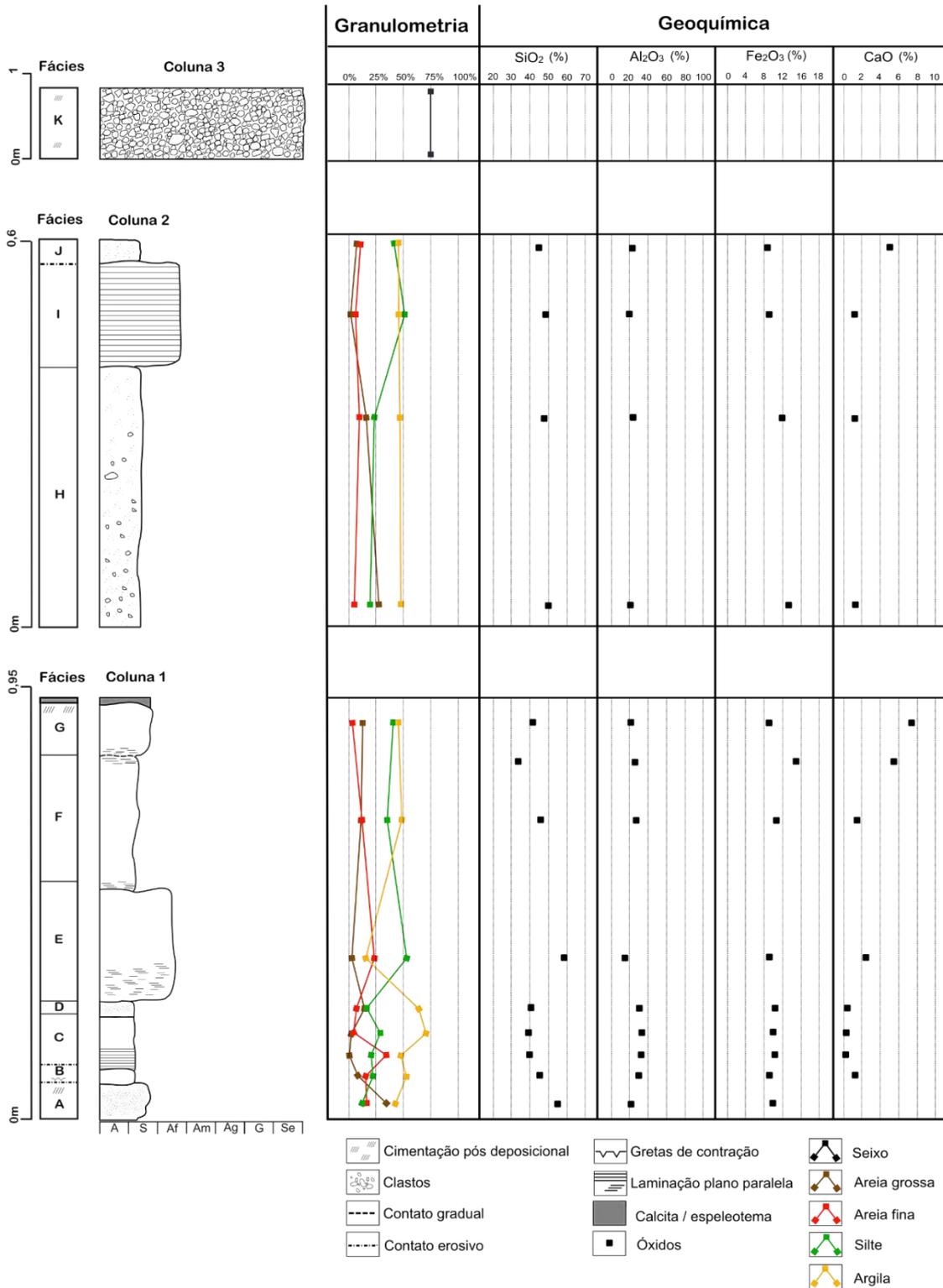


Figura 63 – Organização dos principais resultados obtidos nas colunas na Gruta da Escada. Fácies, colunas, granulometria e química.



## 5. Discussão

### 5.1. Origem dos sedimentos – fontes

Não restam dúvidas de que uma das principais fontes de sedimentos aos depósitos em cavernas é a cobertura pedológica (Figura 65) e o material inconsolidado presente na zona de contato entre a porção inferior do solo e a superior da rocha subjacente (epicarste) (Figura 66).



Figura 65 – Porção de solo exposto em vale associado a afloramentos de calcários. Região de Cerca Grande, Matozinhos. Fonte: Rosário, 2020.



Figura 66 – Frentes de alteração e fraturas preenchidas por sedimentos vermelhos provenientes do contato inferior do solo com a rocha (linhas amarelas). Gruta da Escada. Fonte: Rosário, 2021.

De maneira geral, os depósitos de sedimentos clásticos em cavernas da região do carste de Lagoa Santa exibem algumas características em comum, de modo que aqueles de origem epicárstica (alóctones) correspondem a sedimentos finos (selecionados) em tons avermelhados, associados a galerias em porções mais elevadas em relação ao nível atual, transportados gravitacionalmente via fissuras presentes na rocha e afossilífero (LUND, 1836; 1844; KING, 1956; PILÓ, 1998; 2004; 2005; AULER *et al.*, 2009; HADDAD-MARTIM *et al.*, 2017; BARIONI, 2018) (Figura 66). Quando da conexão das entradas dos condutos com a paisagem (vertente-sumidouro), são então introduzidos sedimentos clásticos mal selecionados, de coloração amarelada/avermelhada, relacionados ao transporte por fluxos de lama e

detritos condicionados com material fossilífero, por fenômenos meteorológicos de alta magnitude (chuvas torrenciais). Além desses, há também os sedimentos de origem do ambiente vadoso (autóctone), que são atribuídos a processos de ampliação de galerias, onde o abatimento de blocos é o principal representante e, secundariamente, sedimentos provenientes da porção insolúvel da rocha (alterita).

Quanto à genética dos solos regionais, Boulet *et al.* (1992), Shinzato (1998), Piló (1998), Auler (2009) e Piló e Castro (2019) relacionam a influência do substrato rochoso na formação dos solos a uma grande afinidade a metapelitos e filitos composto por siltitos, argilitos e arenitos subordinados pertencentes à formação Serra de Santa Helena.

Sendo assim, para efeito comparativo, foram utilizados dados de Piló (1998) (Quadro 3) que realizou análises químicas de três amostras de filitos alterados da região, rocha esta apontada como fonte dos solos e dos sedimentos presentes nas cavernas, que indicaram os seguintes valores médios para os três minerais principais:

<b>Litotipo</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
Filito alterado	65,9%	17,2%	8,3 %

Quadro 3 – Valores médios percentuais obtidos a partir de três amostras de filito alterado encontrados na região. Fonte: Piló, 1998.

Desta maneira, na Gruta da Escada os valores de sílica ficaram entre 54,3% (c1-FA) a 33,4% (c1-FF\*) média de 43,85%, ou seja, valores menores que a média da rocha de origem, demonstrando lixiviação desse mineral durante o transporte ou pós deposição. Já os valores percentuais de alumínio presentes em todas as fácies sedimentares analisadas encontram-se acima da média obtida para os solos regionais, onde a fácies E da seção 1 exibe 18,4% (menor valor) e as demais entre 21,1% e 33,9%. A média ficou em 26,15%, corroborando para entendimento de que o ambiente deposicional teve influência importante nessa acumulação. Da mesma maneira que o alumínio, os valores percentuais de ferro se mostraram superiores quando comparados aos solos regionais, média com valor mínimo de 8,87% (c1-FB) e máximo de 15,6% (c1-FF\*) – média de 12,23%. Tais valores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nessas fácies, superiores aos encontrados na rocha alterada da região, apontam para um ambiente

de saturação sazonal hídrica dos sedimentos para que haja remobilização do ferro, deslocando-se até encontrar um ambiente aeróbico para reoxidação e precipitação.

A textura dominante dos sedimentos nas três seções na Gruta da Escada – a argila –, segue o entendimento de Shinzato (1998), Piló (1998), IBAMA-CPRM (1998) e Piló e Castro (2020) de que os solos muito argilosos que ocupam a região são a fonte para os depósitos das cavernas. Já a fração areia é encontrada em maiores concentrações nos solos da região do carste na medida em que se aprofunda no perfil (cerca de 30%). Entende-se assim que os mais argilosos estão presentes nas porções superiores da cobertura pedológica e os mais arenosos estão nas inferiores, conectando-se a hipótese dos dois tipos dominantes de entrada de sedimentos: via epicarste e via exocarste – conexão com a vertente.

Por outro lado, na Gruta Irmãos Piriás os valores percentuais de  $\text{SiO}_2$  são superiores aos valores médios dos solos da região nas fácies B e B\* (68,3% e 68,4%), da coluna 2, podendo ter influência do material residual da rocha (Membro Pedro Leopoldo) que tem valores significativos de sílica em sua composição. Nas demais fácies sedimentares levantadas os valores de sílica ficam entre 49% e 65,5% (média de 57,25%), inferior à média dos solos regionais, o que demonstra que nesses sedimentos houve lixiviação relativa desse mineral. O valor médio de alumínio obtido através de análises químicas nas fácies sedimentares levantadas na Gruta é de 23,1% (entre 16,3% e 29,9%), acima da média dos solos regionais, corroborando com sua pouca mobilidade em detrimento à sílica. Quanto a presença de óxidos de ferro, as análises evidenciaram baixos valores percentuais em relação aos solos da região (entre 3,48% e 5,83), onde a média é de 4,65% para as amostras sinalizando para um ambiente com eficiente mobilização, exceto a fácies D da seção 1, que apresenta 13,1%, concentração esta em função da posição topográfica (porção elevada da galeria) e de um ambiente óxido-redutor.

Os sedimentos vermelhos descritos como de origem alóctone, epicárstico, cujo transporte está associado a injeções gravitacionais por meio de fissuras (fraturas, diáclases, fendas), podem ser os encontrados na Gruta da Escada na fácies C da seção 1/coluna 1, disposto em forma lenticular inclinada que apoia a hipótese de injeções verticais deste material. Em nenhuma outra fácies analisada tanto na Gruta

da Escada como na Gruta Irmãos Piriás são encontrados sedimentos com tais atributos. Os sedimentos desta fácies (s1-FC) possuem alto percentual de argila (atingindo quase 70%), grau 4 de arredondamento (entre subarredondado e arredondado) e maior valor percentual de  $Al_2O_3$  (33,9%) entre todas as fácies analisadas desta coluna. A porcentagem de  $Fe_2O_3$  (11,1%) mostra-se alta, o que apoia, em contrapartida, os maiores valores de alumínio. Por outro lado, o valor percentual de  $SiO_2$  com 39,4% é considerado baixo quando comparado aos percentuais das demais fácies desta coluna.

Quanto aos sedimentos amarelos ou amarelados presentes nas fácies A, B, D e E da seção 1, I e H na seção 2 e a matriz que reveste a brecha de clastos da seção 3 analisados na Gruta da Escada, exibem maiores percentuais médios de sílica (45,55%) em relação aos obtidos para os sedimentos vermelhos, além de menores percentuais médios de alumínio (24,7%) e ferro (10,38%). Esta configuração permite supor que a acoplagem das entradas das galerias com a vertente foi fundamental para o transporte desses materiais inconsolidados para o interior das cavernas, haja vista que a lixiviação de  $SiO_2$  se deu em menor porcentagem que das demais fácies, mineral este muito resistente à lixiviação. Entretanto, os valores obtidos para  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  são percentualmente menores em relação aos sedimentos vermelhos, como esperado, minerais esses influenciados sobremaneira pela circulação hídrica presente na subsuperfície dos solos.

Particularmente, as condições ambientais incidentes ao longo do tempo nos depósitos formados em períodos de maior e menor atividade hídrica demonstrados por Auler *et al.* (2009) para o clima da região do carste de Lagoa Santa, podem contribuir para mobilização e reorganização de minerais, principalmente o ferro. Ainda, Auler *et al.* (2009) destacam que nas regiões de ocorrência de cavernas tectonicamente estáveis suas conexões com a vertente tendem a permanecer por mais tempo do que em cavernas em áreas tectonicamente ativas, potencialmente, acomodando maior quantidade de sedimentos.

Outro aspecto importante associado ao transporte de sedimentos para o interior das cavernas na região é a influência do equilíbrio entre vegetação e chuva, importante para a abundância de sedimentos a serem transportados (PILÓ, 2004). A

vegetação atua sobre o solo de diversas maneiras, entre eles: proteção erosiva da superfície, redução da velocidade de escoamento, capacidade de infiltração da água no solo, atividades biológicas e compactação dos solos subjacentes (SELBY, 1993).

Indo adiante e vislumbrando a organização da paisagem quando do preenchimento e esvaziamento parcial das galerias subterrâneas da região, inicialmente, para que haja deposição nestes ambientes subterrâneos tem que existir espaços vazios na rocha, gerados principalmente pela dissolução química comandada pela hidrodinâmica de águas aciduladas. Para se ter uma ideia sobre a geração desses espaços vazios, Felipe e Magalhães Jr. (2016) demonstram que as taxas de perda geoquímica anotadas em levantamentos da carga química dissolvida associada à vazão de nascentes na região cárstica de Lagoa Santa podem chegar à 45 toneladas/ano. Esta taxa revela significativo volume de material rochoso lixiviado em solução nas águas, conferindo importante veículo de denudação geoquímica e de resposta na morfologia superficial, diretamente ligada ao potencial de captura sedimentar pela rede de galerias subterrâneas. Ou seja, quanto maior o volume dos espaços vazios no litotipo, maior será a capacidade potencial de condução e aprisionamento de sedimentos e, conseqüentemente, com maior resposta à evolução do modelar da cobertura.

Relativo a esses momentos de preenchimento e esvaziamento da rede de galerias subterrâneas da região e sua conexão com a cobertura superficial, no arranjo da rede de drenagens local onde o nível de base é o Rio das Velhas, Piló (1998) verifica a existência de um desnível de 210 m entre o planalto residual e a atual calha fluvial do Rio das Velhas, com entalhamento iniciado a 1,9 Ma. Posteriormente, quando o Rio das Velhas já se encontrava em sua posição atual ou muito próxima à ela (+/- 650m), Piló *et al.* (2004) apresentam idades superiores a 238.000 anos para deposições de brechas clásticas na Gruta do Sumidouro e duas fases erosivas, sendo a mais antiga de idade máxima de 238.000 anos.

Outro elemento que adentra à discussão é a ocorrência de depósitos sedimentares fluviais na bacia do ribeirão da Mata e Jequitibá, importantes afluentes da margem oeste do Rio das Velhas levantados por Magalhães Jr. *et al.* (2019), em mais elevadas altitudes do que os conhecidos até então. Tais depósitos evidenciam

uma aparente incompatibilidade com a conformação atual, levando-o a correlacionar à uma paleodrenagem com maior capacidade e competência, abandonada durante o Quaternário Tardio e ocupada pelo ribeirão da Mata em seguida (MAGALHÃES JR. *et al.*, 2019). Com isto, seria incutida um acelerado movimento do paleocanal do Rio das Velhas e o natural abandono dos paleovales dos ribeirões Jequitibá e da Mata.

Entende-se assim que a dinâmica de dissecação que confere morfologia ao carste da região com relevante papel do Rio das Velhas está intrínseca à relação entre endocarste e exocarste, iniciada no Quaternário entre o Pleistoceno Tardio e Médio.

## **5.2. Mecanismos de deposição – transporte**

Um dos primeiros relatos sobre os mecanismos de transporte de sedimentos em cavernas na região do carste de Lagoa Santa foi de Lund (1844), que apontou o sedimento vermelho que teria preenchido originalmente a caverna como originado do solo (contato entre a porção inferior do solo e a superior da rocha), transportados em solução através de fissuras (descontinuidades) da rocha.

Quanto a esses mecanismos característicos aos depósitos em cavernas desta região, Piló (1998) argumenta que o transporte de sedimentos via sumidouros é feito através de fluxos gravitacionais do tipo leques aluviais e corridas de lama, de modo que a competência de conduzir e depositar amplos volumes de sedimentos detríticos mal selecionados para o interior de galerias por meio de fluxos gravitacionais se deve a uma morfogênese muito ativa. Sendo assim, os sedimentos exibem uma combinação deposicional envolvendo processos do tipo corrida de detritos e fluxos aquosos (PILÓ, 1998).

A exemplo, na Lapa do Sumidouro, Piló *et al.* (2004) argumentam que as fácies A e B exibem características de pouco transporte e de rápida deposição. Já para fácies C e D, possivelmente são originadas da cobertura de alteração da rocha filítica, introduzidas por meio de fendas alargadas existentes nos níveis superiores da caverna (nível inferior da cobertura de alteração). Por outro lado, a inexistência de laminação na fácies C pode estar associada a fluxos gravitacionais rápidos. Enquanto a laminação descrita na fácies D indica um depósito ocasionado por sedimentos em

suspensão assentados durante baixa velocidade de fluxo. A fácies E, possivelmente proveniente da cobertura de solos, foi introduzida e remanejada na caverna por ação do freático (leques aluviais), quando acoplada à superfície cárstica. E, finalmente, a fácies F que foi apontada como oriunda da porção externa da caverna, introduzida via sumidouro.

Outro exemplo regional encontra-se no artigo de Haddad-Martim *et al.* (2017) que aponta uma associação entre o tipo de transporte e a cor dos sedimentos. Para todas as fácies que apresentam seleção pobre de grãos, fragmentos angulosos e aspecto geral do solo, foi apontado transporte não seletivo; fluxo progressivo e fluxo de detritos episódico para os sedimentos do grupo (II); misto de entrada e queda de rochas para brechas em (III); entrada por fissuras para brechas de clasto matriz suportada em (IV); brechas em (I) e brechas de clasto matriz suportada em (V) infiltração por meio de fissuras.

Desta maneira, observou-se que organização dos depósitos de sedimentos analisados na Gruta da Escada remetem aos padrões clássicos de transporte relatados para a região. A textura dominante das fácies foi a argila, entre 40,93% (c1-FA) e 68,73% (c1-FC\*), com exceção da c1-FE que apresentou 16,67% de argila e, em contrapartida, 57,53% de silte. Estes sedimentos possuem algum grau de arredondamento dos clastos da fração areia (entre subanguloso à muito arredondado), além das estruturas singenéticas e epigenéticas como laminação e gretas de contração (fácies C da seção 1), o que sugere um ambiente misto, com entradas de sedimentos via fissuras (verticais), corridas ou fluxos de lamas e detritos introduzidos nas galerias via entradas (sumidouros) conectadas a vertente, e que concomitantemente ou posteriormente a deposição sofreram retrabalhamento, impondo novas condições de transporte como o em suspensão, proporcionado por um ambiente de águas estagnadas, de baixa atividade hidrodinâmica. Na seção 3, por outro lado, nota-se pelo posicionamento em relação a planta baixa da caverna (próximo à entrada), pela granulometria e organização estratigráfica, pouco transporte ou nenhum. Essa brecha tem impressa características de fluxos gravitacionais rápidos, com ligeira deposição e má seleção dos clastos.

Diferentemente, na Gruta Irmãos Piriás a influência fluvial no transporte dos sedimentos é notória, expressa pela granulometria que constituem as fácies analisadas e arranjo deposicional. Há predomínio da fração areia e silte nas fácies E da seção 1 (40,65% areia grossa), B, B\* e C da seção 2 (respectivamente 36,95%, 28,32% areia fina e 57,07% silte) e B com 37,48% de silte, B\* com 46,02% de areia fina e C (59,29% silte) da seção 3. O tipo de transporte sugere envolvimento de tração/saltação, onde ao longo do percurso esse sedimento se mantém em alguns momentos em suspensão, chocando-se com outros grãos, conferindo-lhes algum grau de arredondamento, como sinalizado pela análise (anguloso a arredondado) sob influência fluvial e lacustre.

As exceções ficam com as fácies D da seção 1 com 59,28% de argila e da fácies A na seção 2 por se tratar de uma brecha clasto suportada, de granulometria superior a seixo. Na fácies D da seção 1 os clastos de quartzo estão embricados, envoltos por matriz argilosa amarelada, com clara organização, possivelmente ação de uma hidrodinâmica de maior expressão.

### **5.3. Estratigrafia**

Como mencionado anteriormente, a penetração de sedimentos pretéritos em cavernas é um processo ininterrupto (AULER *et al.*, 2009). Os registros jovens e antigos da erosão sedimentar são observados em quase todas as cavernas, como fragmentos de sequências sedimentares, camadas de calcita suspensas em galerias ou restos de sedimentos clásticos em paredes e tetos das cavernas. A remoção destes sedimentos quase nunca é total (Figura 67, Figura 68).

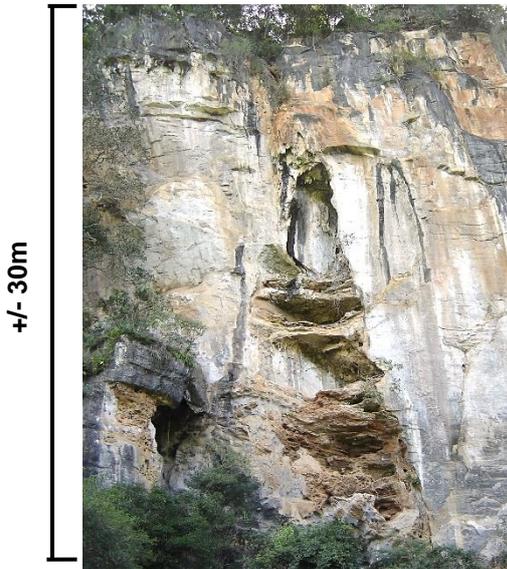


Figura 67 – Sucessão de níveis calcíticos intercalando depósitos (restos) sedimentares. Região da Lapa do Santo (carste de Lagoa Santa). Fonte: Rosário, 2003.



Figura 68 – Seleção granulométrica e níveis calcíticos. Região da Lapa do Santo. (carste Lagoa Santa). Fonte: Rosário, 2003.

De acordo com os estudos para a região do carste de Lagoa Santa (Figura 70), cronologicamente, as primeiras interpretações sobre a estratigrafia dos depósitos das cavernas são realizadas por Lund (1836). Segundo o autor, haveria nelas uma sequência cronoestratigráfica característica, incidindo, da base para o topo de: A) camada formada por uma massa branca afossilífera, provavelmente originada da decomposição do calcário; B) capa estalagmítica espessa, com estrutura cristalina e afossilífera; C) terra vermelha de espessura variada, contendo muitos fósseis e fragmentos de calcário e salitre (camada do *Diluvium*); D) capa estalagmítica fina que possui cavidades preenchidas pelo sedimento superior; E) camada delgada de argila fina com húmus, contendo pequenos ossos e fragmentos de calcário. O autor destacou que somente as três camadas superiores estariam presentes em todas as cavernas.

Em meados do século XX, King (1956), em seu clássico trabalho sobre a geomorfologia do Brasil Oriental, apresentou, baseado nos estudos de Lund, uma cronoestratigrafia típica para os depósitos de cavernas da região de Lagoa Santa. A sequência inicia-se com uma estalagmite basal (A), sobre a qual se depositaram areias (B) com muitos restos fósseis do Plioceno Superior ou que, possivelmente

datam do Pleistoceno Inferior. Essa areia é recoberta por uma outra capa estalagmítica (C), que data da época principal da ornamentação das cavernas.

Os dois autores supracitados, Lund e King, sugerem uma estratigrafia regional para os depósitos de sedimentos encontrados em cavernas, ambos baseados nos estudos de Lund. Posteriormente, importantes estudos foram organizados, como veremos a seguir.

Na Gruta do Baú em Pedro Leopoldo, por exemplo, Piló (1998) registra uma sequência estratigráfica constituída por sedimentos terrígenos e químicos em três episódios de sedimentação relevantes. O autor ainda identifica três capas estalagmíticas, intercaladas por três fácies clásticas. Da base para o topo, tem-se a seguinte sequência: A) capa estalagmítica; B) brecha matriz suportada amarelo-avermelhado; C) capa estalagmítica; D) brecha matriz suportada bruno forte; E) capa estalagmítica; F) brecha de calhaus de quartzo e calcário suportada por matriz lamosa vermelho-amarelado; G) lama vermelho-amarelado com discretas laminações; H) calcita.

Na Gruta dos Macacos, o mesmo autor – Piló (1998) –, registra uma sequência sedimentar que contém na base brecha matriz suportada (A). Sobre essa brecha foi depositada capa estalagmítica (B) com lâminas milimétricas de material lamoso.

Num outro exemplo importante, na Lapa do Sumidouro, localizada entre os municípios de Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, Piló *et al.* (2004; 2005) descreveram a sequência estratigráfica da caverna composta por seis fácies, sendo da base para o topo: A) brecha de grânulos envolto por argila amarelo-avermelhada; B) brecha de seixos de quartzo com matriz lamosa amarelo-avermelhada; C) lama maciça amarela com manchas pretas extremamente dura (cimentação carbonática); D) lama laminada vermelha de consistência dura; E) areia lamosa com clastos de cor vermelha e; F) areia lamosa com bioclastos.

Não muito distante dos sítios estratigráficos citados, na Gruta da Caianga, situada próxima ao conjunto de Cerca Grande em Matozinhos, Auler *et al.* (2006) registraram sequência estratigráfica com duas fácies, em cuja base (A) destaca-se brecha de ossos matriz suportada por lama vermelho-amarelado, fortemente

cimentada pela calcita, sendo que posteriormente sobre a superfície erosiva apresentada foi depositada uma capa estalagmítica (B).

Num ambiente deposicional um pouco diferente, associado à área abrigada (na Lapa Vermelha IV (Figura 69)) localizada no município de Pedro Leopoldo, Araújo e Piló (2017) caracterizaram cinco fácies, sendo: Fácies A: Lama arenosa estratificada vermelho amarelado; Fácies B: lama arenosa carbonatada cinza avermelhado; Fácies C: Lama arenosa misturada bruno avermelhado; Fácies D: Cascalho suportado por matriz areia lamosa amarelo avermelhado.

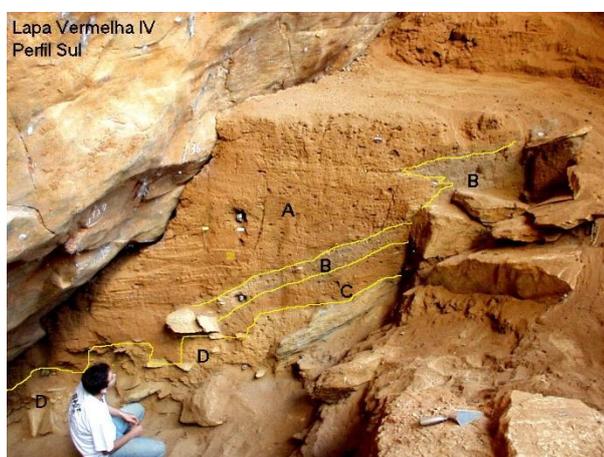


Figura 69 – Vista parcial da seção sul da Lapa Vermelha IV, com as fácies sedimentares em destaque. Fonte: Piló, 2003.

Na Gruta Cuvieri situada em Matozinhos, Haddad-Martim *et al.* (2017) separaram os sedimentos analisados em oito fácies de sedimentos clásticos e uma de acumulação química. Dessa maneira, os autores estabeleceram a estratigrafia da caverna em cinco grupos, sendo da base para o topo: (I) relictos de brechas geralmente em contato com a rocha base, fortemente cimentadas, dispersos nas galerias e sedimentos recentes enterrados, na maioria das vezes em contato com a rocha base (brecha vermelha); (II) margas semelhantes a solos de dolina (lama castanho-avermelhado, lama mosqueada); (III) brecha misturada, intensamente cimentada, com clastos calcários; (IV) *diamicton* com características mistas e irregularmente cimentadas (*diamicton* mosqueado, *diamicton* castanho avermelhado);

e (V) *diamicton* semelhante a solos do epicarste (*diamicton* castanho fossilífero, *diamicton* castanho).

Fica claro que as organizações estratigráficas destes depósitos possuem semelhanças, como intercalações de níveis terrígenos e calcíticos ou mesmo da influência pós deposicional na cimentação das brechas, diamictito ou a presença de fósseis. Também fica evidente que a evolução e conformação da paisagem local, associadas as características singulares de cada caverna impõem importante subsídio para a organização estratigráfica dos depósitos.

Quando olhamos a organização das fácies sedimentares das seções levantadas nas Grutas da Escada e Irmãos Piriás, o empilhamento estratigráfico apresenta algumas semelhanças com os modelos regionais, destacando-se os níveis estalagmíticos e as laminações plano paralelas.

Na da Escada a associação das fácies permitiu a composição de sete grupos sedimentares distintos, parte deles (seção 1) seladas ou sob uma capa estalagmítica: I (fácies B,F,G – lama argilosa em tons amarelos, com discretas laminações, concentrações de óxidos de ferro ocupando porções lateralizadas do conduto); II (fácies A e D – lama arenosa de tons pálidos de amarelo, grande quantidade de clastos de quartzo tamanho areia); III (fácies C – lama com laminações de cor vermelha, bastante argilosa, com gretas de dilatação); IV (fácies E – lama com discretas laminações de cor amarelo pálida); V (fácies H e J – I – lama arenosa de cor bruno amarelado, clastos de quartzo de tamanhos entre granulo e seixo); VI (fácies I – lama laminada de cor bruno) e; VII (fácies K – brecha clasto matriz suportada muito cimentada, de clastos de quartzo angulosos a subarredondados e matriz arenoargilosa amarelada).

Já na Gruta Irmãos Piriás, essa associação propiciou a organização estratigráfica em três grupos, sendo eles: I (fácies A – brecha de clastos matriz suportada, com clastos subarredondados a arredondados tamanho seixo à calhau sem organização; matriz de cor amarelada e consistência muito dura); II (fácies B e C – lama com laminações plano paralelas, cor marrom pálida; entre essas laminações intercalam material acinzentado; fácies separadas por nível estalagmítico/paleopiso) e; III (fácies D e E – brecha de clastos matriz suportada, com clastos de quartzo

angulares à arredondados, imbricados, alguns verticalizados, de forma organizada; matriz de cor amarelada ( fácies D); consistência muito dura.

Na Lapa Mortuária de Confins escavada por H. V. Walter (1948) e na Lapa do Beijo investigada por Barioni (2018) não há registro de sequência estratigráfica com organização de fácies. No primeiro caso há o relato de uma escavação abaixo de uma crosta estalagmítica em meio a sedimentos amarelos avermelhados e, no segundo, um volume homogêneo de argila.

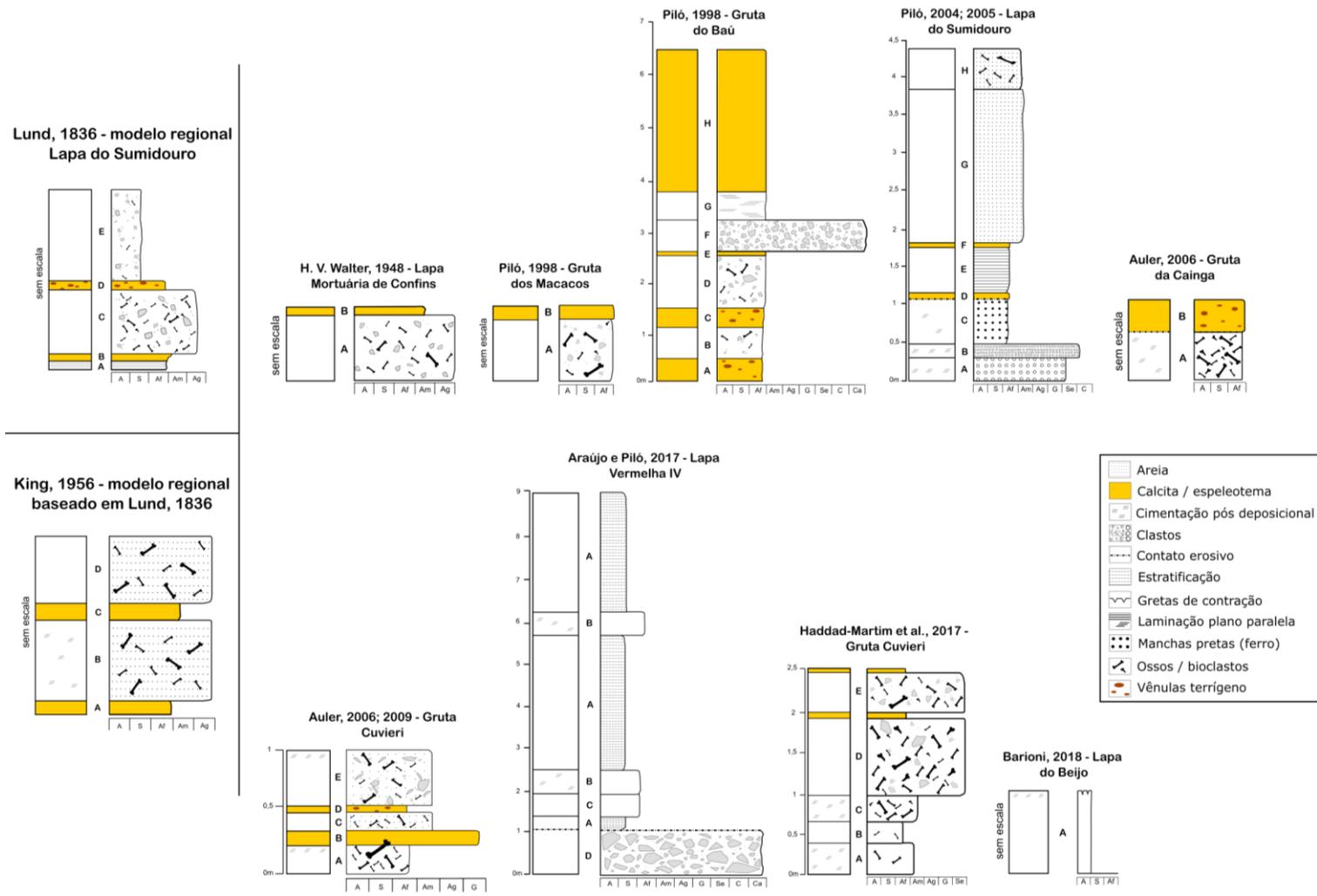


Figura 70 – Organização estratigráfica e granulométrica dos principais depósitos de sedimentos clásticos investigados em cavernas da região cárstica de Lagoa Santa.

#### 5.4. Ambiente de Deposição

Há referências sobre processos que envolviam modificações nos sedimentos clásticos depositados, ou seja, pós-deposição, nas cavernas da região cárstica de Lagoa Santa na maioria dos trabalhos produzidos por Lund ainda no século XIX.

Na Lapa do Sumidouro, por exemplo, Lund (1884) distingue sedimentos que tiveram influência da oscilação do lençol freático daqueles que não. Sobre os que sofreram ação da água, ele descreve características nos sedimentos atribuídos a processos químicos, além do registro de depósitos laminares, indicando ambiente de deposição em águas estagnadas. Fases erosivas também são mencionadas, onde galerias foram parcialmente ou totalmente desobstruídas por fluxos hídricos intensos e conjuntamente, muitas vezes, redepositado nas galerias adjacentes.

De maneira geral, na região cárstica de Lagoa Santa, Auler *et al.* (2009) argumentam que restos de preenchimento de sedimentos clásticos são frequentemente achados presos a paredes e tetos, evidenciando episódios de preenchimento e fases de remoção de sedimentos, onde inclui-se a sedimentação química – espeleotemas isolados ou associadas ao preenchimento clástico.

Ainda na Lapa do Sumidouro, as porcentagens de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontradas por Piló (2004) em sedimentos foram muito baixas (21% e 6,2%, respectivamente). Por outro lado, os valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  são altos (14,9%), indicando um ambiente de saturação sazonal dos sedimentos pela água capaz de promover a remobilização do ferro que se desloca até encontrar um ambiente aeróbico onde reoxida (rebaixamento do lençol) e precipita. Os valores químicos apontaram que a fácies fossilífera foi submetida às frequentes oscilações do nível freático no interior da caverna, com exportação da sílica e do alumínio e segregação do ferro (PILÓ, 2004). Um ponto importante a ressaltar aqui é que as seis fácies sedimentares registradas são distintas e, não, alterações derivadas do sedimento vermelho sob influência do freático, como propôs Lund (1844) (PILÓ *et al.*, 2004).

Noutro exemplo, na Gruta Cuvieri, Haddad-Martim *et al.* (2017) argumentaram que o interior da mesma caverna o histórico de deposição pode alternar entre distintos compartimentos em função da morfologia, do fluxo de entrada de sedimentos, da história evolutiva e de sua relação com a paisagem superficial. Podem ser ainda mais complexos quando próximos a entradas, onde agentes erosivos podem atuar de

maneira mais agressiva do que em outras porções da caverna (CAMPY e CHALINE, 1993). Ainda de acordo com Haddad-Martim *et al.* (2017), modificações no grau de cimentação dos sedimentos foram relevantes na separação de brecha vermelha e brecha marrom dos outros depósitos. Entretanto, a cimentação pode ser interpretada como produto de processos pós-deposicionais e os registros dos depósitos indicam que são resultado da deposição contínua no ambiente.

Não afastado das demais interpretações, nas Grutas da Escada e Irmãos Piriás o histórico de deposição alternou nos mais distintos compartimentos das cavernas devido a morfologia das galerias, do fluxo de entrada de sedimentos, além da sua relação evolutiva conexa à paisagem superficial.

Seções mais estreitas lateralmente e alongadas verticalmente, condutos preenchidos e rede labiríntica são alguns dos atributos morfológicos que deram sustentação a interpretações de fluxos de menor dinâmica, como águas estagnadas, de escoamento lento, com funcionamento semelhante a um ralo.

Naquelas seções mais avantajadas, tanto lateralmente como verticalmente, estrangulamentos entre salões e uma dinâmica hídrica importante tanto do ponto de vista de deposição como de erosão, corroboram com os tipos de depósitos investigados, formados basicamente por materiais em carga de fundo e por sedimentos associados a fluxos lentos.

## **6. Conclusões**

Na tentativa de organizar os resultados das análises relativos às fontes, mecanismos de transporte dos sedimentos e estratigrafia (ambiente de deposição) é proposta uma associação entre estes e as fácies levantadas. O Quadro 4 sintetiza essa associação que foi baseada na classificação de sedimentos clásticos proposta por White (2007).

<b>Associações de fácies</b>	<b>Classe</b>	<b>Mecanismo (s) de Transportes</b>	<b>Origem</b>	<b>Morfologia e textura</b>
<b>ii</b>	<b>Fluviais</b>	tração, saltação e suspensão (acrecção paralelo)	alóctone com contribuição autóctone	Bancos e leitos fluviais em canais ativos; bancos e terraços com canais abandonados. Ampla variação textural: argila a seixo.
<b>i</b>	<b>Gravitacionais</b>	abatimentos (queda livre)	autóctone	Blocos de colapso, do teto ou paredes.
<b>i, ii, iii</b>		fluxo de detritos (corrida de lama)	alóctone com contribuição autóctone	Cones, bancos e pilhas de sedimentos, muitas vezes preenchendo galleria, diamictitos, brechas matriz e clasto suportada.

Quadro 4 – Síntese das associações de fácies analisadas nas Grutas da Escada e Irmãos Piriás, de acordo com a classificação dos sedimentos clásticos de cavernas (adaptado de White, 2007).

Na Gruta da Escada, em função do número de entradas conectadas a paisagem (em algum momento da evolução da vertente), da configuração da bacia hídrica, da composição mineralógica do litotipo e das características sedimentares apresentadas nas fácies analisadas, observa-se que:

i) quando a fonte dos sedimentos é alóctone e está próxima às entradas da caverna (seção 3 – fácies K / brecha clasto suportada), ou seja, derivados da cobertura de alteração de rochas da Formação Serra de Santa Helena e veios de quartzo, caracterizados como depósitos de entrada, houve transporte a distâncias curtas, por fluxo de detritos (corrida de lama) e de blocos de calcário ocasionais. O material clástico é de anguloso à subanguloso, composto predominantemente de quartzo tamanho seixo à calhau e blocos de calcário tamanho calhau um pouco mais

arredondados, cimentados por uma matriz argiloarenosa muito dura, de cor amarelo avermelhada. Preenche porção de parede e teto da seção de forma desorganizada, remetendo a impulsos de sedimentos rapidamente cimentados (diagênese).

ii) quando a fonte dos sedimentos provém da acoplagem da superfície com as entradas da caverna (alóctone), capturados, também provenientes da cobertura metapelítica e de veios de quartzo, mas que sofreram algum tipo de transporte, retrabalhamento e/ou influência de condições ambientais cíclicas ou sazonais locais (seção 1 e seção 2, exceto fácies J / lama laminada e lama argiloarenosa), ocorreram fluxos de detritos ou corridas de lama com contribuição de material autóctone. Predominam sedimentos argilosos, com valores de sílica alto, alumínio e ferro baixos, onde este último encontra-se muitas vezes em forma de nódulos tamanho areia a grânulo e manchas, ocupando de forma amorfa porções das fácies. Estruturas singenéticas como laminações plano paralelas algumas vezes discretas são observadas principalmente no contato superior das fácies, que transitam gradualmente em tons amarelados a avermelhados, possivelmente influenciados pelo regime hídrico sazonal, onde são lixiviados os principais minerais que atribuem cor. Esse material parece ter preenchido todo o conduto antes de ser removido (erodido), e possivelmente retrabalhado e redepositado, além da contribuição no transporte de novos sedimentos (alóctones e autóctones) e reorganização (fluxo tipo decantação); e

iii) quando a fonte são sedimentos que penetram por pequenas aberturas ou fissuras conectadas ao carste superficial, não penetráveis pelo ser humano (fácies J – seção 2). Trata-se de fluxos de sedimentos argilosiltosos, alóctones, com alguma contribuição autóctone (rara), que sofreram determinado tipo de processo de seleção em função do tamanho dessas aberturas, influenciados pela gravidade, com baixos valores percentuais de sílica, alumínio e ferro e importante percentagem de cálcio. Os clastos da fração areia são de arredondados a subarredondados, com matéria orgânica e fragmento de pequeno osso da fauna, possivelmente atual. Esse material solto preenche a greta de dilatação presente entre as fácies H e I e a parede oeste da seção, num contato erosivo. A cor marrom escura é proporcionada pela presença de matéria orgânica.

Apesar da rocha estar na base da coluna litoestratigráfica regional, a Gruta Irmãos Piriás posiciona-se topograficamente em maior altitude que a Gruta da Escada, no contato entre o embasamento cristalino – gnaisse – e mármore calcítico do Membro Pedro Leopoldo (calcários). No entanto, a cobertura metapelítica (metargilitos e metassiltitos) da Formação Serra de Santa Helena também recobria essa área, apesar do posicionamento mais a oeste em relação ao centro do carste de Lagoa Santa, margem oeste do Ribeirão da Mata. A conexão da entrada da caverna com a superfície se faz na base de um afloramento em vale cego, onde uma pequena bacia hídrica alimenta um córrego que, capturado pela cavidade, perfaz toda sua extensão. Dessa maneira, em função da conexão da entrada da caverna à paisagem, do desenho da bacia hídrica, da composição mineralógica dos litotipos e das características sedimentares exibidas nas fácies estudadas, observa-se que:

i) quando a fonte dos sedimentos é alóctone, próxima à entrada da caverna (seção 1 – fácies D e E / brecha clasto suportada e lama com discretas laminações paralelas; e seção 2, fácies A / brecha clasto suportada com forte cimentação por calcita), ou seja, derivados da cobertura metapelítica da Formação Serra de Santa Helena e veios de quartzo, o transporte foi do tipo misto de fluxo fluvial (fácies canal) e águas estagnadas (decantação). O material clástico é majoritariamente subarredondado - subanguloso, composto predominantemente de quartzo tamanho seixo a cascalho com certa organização (imbricamento) cimentado por uma matriz argiloarenosa amarelada com laminações plano paralelas discretas revestidas, em alguns níveis, por uma crosta ferruginosa, escura, confirmado pelas análises químicas que apontam valores percentuais altos de ferro e cálcio, e baixo de alumínio. A posição topográfica deste depósito na seção corrobora para o momento de entrada desses materiais quando da acoplagem da paisagem com a abertura dessa galeria, que foi preenchida. Os clastos imbricados e a argila depositada acima, abaixo e revestindo-os, parecem pertencer à mesma fonte sedimentar organizada de acordo com as condições do ambiente, ora por fluxos fluviais (carga de fundo) relacionadas à fácies de canal (White, 2007), ora por decantação; e

ii) quando a fonte dos sedimentos é alóctone com contribuição autóctone, sendo os metapelitos (filitos e argilitos) provenientes da cobertura, o material residual

proveniente da rocha – autóctone –, é composto predominantemente por quartzo (areia fina à areia grossa) que contém altos valores de sílica presente nas fácies analisadas (seções 2 e 3 – fácies B e C / lama arenosiltosa com laminações plano paralelas e lama siltoarenosa com laminações plano paralelas). Tanto o litotipo gnaisse do Complexo Belo Horizonte quanto os calcários (mármore) da Formação Pedro Leopoldo possuem valores importantes de sílica em sua composição – média de 23%, alumínio (2,95%) e ferro (1,75%), superiores às observadas nos calcários do Membro Lagoa Santa (PILÓ, 1998). Este resíduo do processo de dissolução da rocha apoia os valores obtidos nas análises químicas dessas fácies. Os latossolos sinalizados por Shinzato (1998), Piló (1998) e Piló e Castro (2020) que ocupam o planalto cárstico apresentam valores médios de 32% para sílica. Por outro lado, os valores de alumínio e ferro são mais baixos em comparação aos valores dos solos do planalto cárstico, evidenciando lixiviação desses minerais, especialmente o ferro, secundariamente o alumínio. Desta maneira, entende-se que essa mistura entre fontes alóctone e autóctone proporcionada pelo ambiente dinâmico, com influência hídrica perene, foi determinante para as altas concentrações de sílica presentes nas fácies dessas seções – acima de 50% –, e as baixas concentrações de alumínio e especialmente de ferro que foi mobilizado. Tanto estruturas singenéticas como laminações plano paralelas e imbricamento de clastos, como epigenéticas (pós-deposicionais), cimentação por calcita e bioturbação estão presentes nas fácies destas seções, apontando mais uma vez para um ambiente ativo, com fases em águas estagnadas e de inundação que proporcionam a deposição plano paralela e seleção granulométrica, mediante fases de significativo gradiente hidráulico com material clástico em suspensão de maior granulometria (fração areia). As cores exibidas nas fácies apresentam, em geral, tons pálidos de amarelo e marrom, com laminações plano paralelas com alternância de cores, também influência deste ambiente com regime fluvial perene com condições extremas sazonais, mobilizando e erodindo os óxidos que auxiliam na pigmentação dos sedimentos.

De acordo com as análises, na região cárstica de Lagoa Santa, os depósitos sedimentares em cavernas exibem padrões de sedimentação clástica e erosão intercalados por níveis de deposição química, calcíticos, mais resistentes ou selando

esses depósitos, como é o caso da seção 1 na Gruta da Escada e apresentado na maioria dos estudos publicados para a região (Lund, 1844; Walter, 1948; Piló, 1998; Piló *et al.* 2004; Auler *et al.* 2003; 2005; 2006).

Relativo à drenagem capturada pela Gruta Irmãos Piriás que se faz em vale cego e depois de um trajeto subterrâneo pelo seu desenvolvimento, ressurgue e alimenta o córrego da Lapa, tributário do Ribeirão da Mata, nível de base local, configura um padrão pouco comum na região do carste Lagoa Santa. De acordo com Piló (1998), um sistema fluvial no carste – fluviocarste, estaria relacionado a atributos morfológicos fluviais e cársticos em áreas de transição, como os vales cegos, onde sumidouros capturam drenagens superficiais.

A conformação regional apresentada pode ser atribuída, como discutido, à idade do carste (Pleistoceno Tardio - paleocarste), onde o recuo continuado do nível de base local abandonou redes de galerias em posições topográficas mais elevadas, desconectadas do atual nível freático, as incutindo uma evolução a posteriori predominantemente erosiva, de destruição e secção dos condutos (Pleistoceno Superior).

## 7. Referências Bibliográficas

ARAÚJO, A. G. M. e PILÓ, L. B. **Towards the Development of a Tropical Geoarchaeology: Lagoa Santa as an Emblematic Case Study.** Springer International Publishing AG 2017 373 P. Da-Gloria *et al.* (eds.), Archaeological and Paleontological Research in Lagoa Santa, DOI 10.1007/978-3-319-57466-0\_17. 2017.

AULER, A. S. **Hidrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos – Pedro Leopoldo Karst, Brazil.** Dissertação de Mestrado. Bowling Green: Faculty of the Department of Geography and Geology / Western Kentucky. 1994, 110 p.

AULER, A. S. **Karst Evolution and Paleoclimate of Eastern Brazil.** Tese de Doutorado. School of Geographical Sciences, Bristol University. 1999, 269 p.

AULER, A. S. **Peter Wilhelm Lund e sua visão das cavernas.** *In:* O Carste. Volume 14, nº 01. Belo Horizonte. 2002, 24-30 p.

AULER, A.S., PILÓ, L.B., SMART, P., WANG, X., NEVES, W.A., CHENG, H. & EDWARDS, L.E. **Cronologia e processos de deposição da megafauna quaternária em cavernas brasileiras.** *In:* CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO - ABEQUA, 9. Resumos, Recife, 1 CD (212 PDF). 2003, 3 p.

AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; SAADI, A. **Ambientes Cársticos.** *In:* SOUZA, C. R. G., SUGUIO, K., OLIVEIRA, A. M. S. e de OLIVEIRA, P. E. O Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto. Editora Holos. Capítulo 15, 2005, 321-336 p.

AULER, A.S., PILÓ, L. B. **Lagoa Santa Karst: cradle of Brazilian cave studies.** *In:* Vieira, B.C., Salgado, A., Santos, L. (Eds.), Landscapes and Landforms of Brazil. Springer Netherlands, Dordrecht, 2005, 183–190 p.

AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; SMART, P. L.; WANG, X.; HOFFMANN, D.; RICHARDS, D. A.; EDWARDS, R. L.; NEVES, W. A.; CHENG, H. **U-series dating and taphonomy of Quaternary vertebrates from Brazilian caves.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 240, 2006, 508–522 p.

AULER, A.; SMART, P.L.; WANG, X.; PILÓ, L.B.; EDWARDS, L. e CHENG, H. **Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance.** *Geomorphology*. V.106, 2006, 142-153 p.

BARBOSA, G. V. **Notícia sobre o Karst na mata de Pains.** *Boletim Mineiro de Geografia*, Belo Horizonte, nº 2 e 3, 1961, 3-21 p.

BARIONI, A. **Caracterização das formações superficiais do Carste de Lagoa Santa: um estudo de caso da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa (Município de Lagoa Santa, Minas Gerais).** Dissertação de Mestrado, FFLCH. Universidade de São Paulo. 2018.

BOSH, R.F. e WHITE, W.B. **Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers.** *In: SASOWSKY, I.D. AND MYLROIE, J. Studies of cave sediments – Physical and Chemical records of paleoclimate.* Dordrecht: Springer. 2007, 1-22 p.

BÖGLI, A. **Karst Hydrology and Physical Speleology.** Belin: Springer Verlag, 1980, 284 p.

BOULET, R., KOHLER, H.C., FILIZZOLA, E. F. & MALTA, I. M. **Estudo da cobertura pedológica de uma vertente adjacente à uvala do Conjunto Cárstico da Lapa Vermelha de Lagoa Santa, MG.** *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO*, 3. Belo Horizonte. Imprensa Universitária. 1992, 59-64 p.

BULL, P. A. **Dendritic surge marks in caves.** Transactions of the British Cave Research Association, v. 3, n. 1, 1976, 1-5 p.

BULL, P. A. **A study of stream gravels from cave: agent Allwedd Wales.** Zeitschifte fur Geomorphologie, v. 22, n. 3, 1978, 275-296 p.

BULL, P. A. **Towards a reconstruction of time-scale and paleoenvironments from cave sediment studies.** Timescale in Geomorphology. John Wilwy & Sons, 1980, 177-187 p.

BULL, P. A. **Some fine-graned sedimentation phenomena in caves.** Earth Surface and Landforms, v. 6, 1981, 11-22 p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico.** Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada. 2009, 36 e 46 p.

CAMPY, M. e CHALINE, J. **Missing records and depositional breaks in French Late Pleistocene cave sediments.** Quat. Res. 40, 1993, 318–331 p.

CODEMIG/CPRM. **Mapa geológico de Minas Gerais.** Escala: 1:1.000.000. 2014.

COUTARD, J. P; KOHLER, H. C. & JOURNAUX, A. **Comentário do Mapa do Carste Região de Pedro Leopoldo- Lagoa Santa, MG, Brasil.** Laboratoire D'analyse et de Cartographie des Formations Superficielles de l'université de Caen, et le Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen – France. Escala 1:50.000. 1978.

DAVIS, W. M. **Origin of limestone caverns.** Geological Society of America Bulletin, v. 41, 1930, 475-628 p.

EK, C. & QUINIF, Y. **Les sédiments detritiques des grottes: aperçu synthétique.** Annales de la Société Géologique de Belgique, t.111, 1988, 1-7 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos.** Rio de Janeiro, 2013, 412 p.

FARRAND, W.R. **Sediments and stratigraphy in rockshelters and caves: a personal perspective on principles and pragmatics.** Geoarchaeology 16, 2001, 537–557 p.

FEATHERS, J.; KIPNIS, R.; PILÓ, L. B.; ARROYO-KALIN, M.; COBLENTZ, D. **How Old Is Luzia? Luminescence Dating and Stratigraphic Integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil.** Geoarchaeology: An International Journal, Vol. 25, No. 4, 395–436 p. Wiley Periodicals, Inc. Published online in Wiley Interscience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)). DOI:10.1002/gea.20316. 2010.

FELIPPE M. F. & MAGALHÃES Jr. A. P. **A contribuição das nascentes na desnudação geoquímica: borda oeste da Serra do Espinhaço Meridional.** Revista Brasileira de Geomorfologia (Online), São Paulo, 2016, v.17, n.1, (Jan-Mar) 79-92 p. - <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i1.878>.

FERRARI, J. A. **Interpretação das feições cársticas na região de Iraquara, Bahia.** Dissertação de Mestrado. Salvador. Universidade Federal da Bahia. 1990, 93 p.

FORD, T. **Sediments in caves.** Trans. British Cave Research Association. v.2, nº 1, 1975, 41-46 p.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P.W. **Karst Geomorphology and Hydrology.** London, Unwin Hyman. 1989, 601 p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **As grutas em Minas Gerais** – Gruta dos Poções (Município de Pedro Leopoldo). Departamento Geral de Estatística. Divisão de Estatística Fisiográfica e da Viação. Estado de Minas Gerais, Brasil. Primeira Edição, 1939. Oficinas Gráficas da Estatística – Belo Horizonte. 1939, 204 a 209 p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Municípios; Brasil**. 1: 5.000.000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> - acessado em 16/05/2020, 2020.

GILLIESON, D. **Cave sedimentation in the New Guinea highlands**. Earth Surface Process and Landforms, v. 11, 1986, 533-543 p.

GOMES, M. C. A. A. & PILÓ, L. B. **As minas de salitre: a exploração econômica das cavernas em Minas Gerais nos fins do período colonial**. Espeleo-tema, São Paulo, v. 16, 1992, 83-93 p.

GBPE – Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas. **Mapa topográfico Gruta da Escada**. 4C BCRA. 2004.

HADDAD-MARTIM, P. M.; HUBBEB A.; GIANNINID P. C. F.; AULER A. S.; PILÓ L. B.; HUBBE, M; MAYER, E.; WANG X.; CHENG, H.; EDWARDSI, R. L.; NEVES, W. A. **Quaternary depositional facies in cave entrances and their relation to landscape evolution: The example of Cuvieri Cave, eastern Brazil**. Catena 157. 2017, 372–387 p.

HARMAN, R., GALLAGHER, K., BROWN, R., RAZA, A., BIZZI, L. **Accelerated denudation and tectonic/geomorphic reactivation of the cratons of northeastern Brazil during the Late Cretaceous**. Journal of Geophysical Research 103, 1998, 27091–27105 p.

HERMAN, E.K.; TORAN, L.; WHITE, W.B. **Clastic sediment transport and storage in fluviokarst aquifers: an essential component of karst hydrogeology.** Carbonates and Evaporites, v.27, 2012, p.211-241.

JENNINGS, J.N. **Karst Geomorphology.** Oxford: Basil Blackwel. 1985, p. 281.

KARMANN, I. **Evolução e dinâmica do Sistema Cárstico do Alto Vale Ribeira do Iguape, sudeste do Estado de São Paulo.** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1994.

KING, L. C. **A geomorfologia do Brasil central.** Revista Brasileira de Geomorfologia. v. 17, 1956, 3-265 p.

KOHLER, H. C; COUTARD, J. P. & QUEIROZ NETO. J. P. **Excursão a região cárstica ao norte de Belo Horizonte.** *In:* Colóquio Interdisciplinar Franco-Brasileiro: Estudo e Cartografia de Formações Superficiais e suas Aplicações em Regiões Tropicais, São Paulo, USP, v. II, 1978, 20-43 p. (guia de excursões).

KOHLER, H. C. **Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa- MG.** São Paulo: Depto. de Geografia - Universidade de São Paulo (tese de Doutorado). 1989, 113 p.

KOHLER, H.C. **Geomorfologia Cárstica na Região de Lagoa Santa – MG.** Tese de Doutorado. Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1994.

LAUREANO, F. V. **O registro sedimentar clástico associado ao sistema de cavernas Lapa Doce e Torrinha, Município de Iraquara, Chapada Diamantina – BA.** Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências - USP. São Paulo. 1998.

LAUREANO, F. V. e KARMANN, I. **Sedimentos clásticos em sistemas de cavernas e suas contribuições em estudos geomorfológicos.** Revista Brasileira de Geomorfologia. Volume 14, nº 1, 2013.

LUND, P.W. 1836. **Cavernas existentes no calcário no interior do Brasil, contendo algumas delas ossadas fósseis - Primeira Memória.** *In:* Paula Couto, C. de. (ed.). Memórias sobre a paleontologia brasileira, Instituto Nacional do Livro, 2013, 67-93 p.

LUND, P.W. **Notícia sobre ossadas humanas fósseis achadas numa caverna do Brasil.** *In:* Paula Couto, C. de. (ed.). Memórias sobre a paleontologia brasileira, Instituto Nacional do Livro, 1844, 465-488 p.

LUND, P. W. **Memórias sobre a paleontologia brasileira.** Traduzidas, revistas e comentadas por Carlos de Paula Couto. Rio de Janeiro: Instituto Nacional do Livro. 1950 (edição), 589 p.

MAGALHÃES Jr., A. P.; Barros, L. F. P.; Cherem, L. F. S.; Pinto, R. C. **Eventos neocenoicos de reorganização de rede de drenagem: um paleovale do Rio das Velhas (Minas Gerais, Brasil) em seu médio curso?** Estudos do Quaternário, 20, APEQ, Braga, 2019, 1-10 p. / <http://www.apeq.pt/ojs/index.php/apeq>.

MARTINI, I. **Cave clastic sediments and implications for speleogenesis: New insights from the Mugnano Cave (Montagnola Senese, Northern Apennines, Italy).** Geomorphology. 2011, 07.024.

MILSKE, J. A.; ALEXANDER JR., E. C.; LIVELY, R. S. **Clastic sediments in Mystery Cave Southeastern Minnesota.** NSS Bulletin, v. 45, 1983, 55- 75 p.

MOEYERSONS, J. **Geomorphological process and their paleoenvironmental significance at the Shum Laka cave (Bamenda, western Cameroon).**

Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology. v. 133, 1997, 103-116 p.

NEWITT, D. M.; RICHARDSON, J. F.; ABBOTT, M.; TURTLE, R. B. **Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes.** Transactions of the Institution of Chemical Engineer. v. 3, 1955, 93-110 p.

NIMER, E. **Clima.** In: FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Geografia do Brasil; região Sudeste. Rio de Janeiro: IBGE. 1977, 51-89 p.

OSBORNE, R. A. L. **Lateral facies, uncoformities and stratigraphic reversals: Their significance for cave sediment stratigraphy.** Cave Science. transactions British Cave Research Association. v. 11, nº3, 1984, 175-184 p.

PALMER, A. N. **Origin and morphology of limestones caves.** Geological Society of America Bulletin, 103, 1991, 1-21 p.

PAULA COUTO, C. **Peter Wilhelm Lund: Memórias sobre a paleontologia brasileira.** Instituto Nacional do Livro, Rio de Janeiro. 1950.

PILÓ, L. B. **A morfologia cárstica do baixo curso do Rio Peruaçu. Januária-Itacarambi, MG.** Monografia de Graduação. Belo Horizonte: Instituto de Geociências da UFMG, Depto de Geografia. 1989, 80 p.

PILÓ, L. B. **Rochas carbonáticas e relevos cársticos em Minas Gerais.** Revista O Carste, volume 19, 1997, 72-78 p.

PILÓ, L. B. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú; Carste de Lagoa Santa, MG.** Departamento de

Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – USP, São Paulo. Tese de Doutorado. 1998.

PILÓ, L. B. **Geomorfologia Cárstica**. Revista Brasileira de Geomorfologia. Volume 1, nº 1; 2000, 88-102 p.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S.; NEVES, W. A.; WANG, X.; CHENG, H.; EDWARDS R. L. **Revisitando a Lapa do Sumidouro: Marco paleo-antropológico do Quaternário Americano**. Revista Brasileira de Paleontologia. 7 (3). 2004, 337-348 p.

PILÓ, L. B.; CASTRO, S. S. **Soils of the Lagoa Santa Karst**. Springer Nature Switzerland AG. A. S. Auler and P. Pessoa (eds.), Lagoa Santa Karst: Brazil's Iconic Karst Region, Cave and Karst Systems of the World. 2020.

PINEDO, R. **A sedimental study of detrital materials in the Hayal de Ponata Systems, Sierra Nevada, north Spain**. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY. Budapest, 1989. Proceedings. UIS. 1989, 92-94 p.

PROUS, A. **O homem pré-histórico e a megafauna pleistocênica no Brasil: uma revisão bibliográfica**. O Carste. v. 14, 2002, 52-59 p.

QUINIF, I. e MAIRE, R. **Etudes sedimentologiques et datations radiométriques das Le Grouffre de la Pierre Saint Martin (Pyrénées, France): contribution à l'étude du quaternaire Pyrénéen**. International Congress of Speleology, Barcelona, Proceedings UIS. 1986.

QUINIF, I. e MAIRE, R. **Pleistocene deposits in Pierre Saint-Martin Cave, French Pyrenees**. Quaternary Research. V. 49, 1998, 37-50 p.

RENAULT, P. **Contribution al'étude actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénese**. Annales de Spéléologie, v. 23, n.3, 1968, 575-593 p.

SANTOS, E. S., SOARES, B. F. E TRAVASSOS, L. E. P. **Panorama inicial dos estudos pedológicos em regiões de carste tradicional.** ANAIS do 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia Ponta Grossa-PR, 21-24 de julho de 2011 – Sociedade Brasileira de Espeleologia. 2011.

SASOWSKY, I. D.; WHITE, W. B.; SCHMIDT, V. A. **Determination of stream-incision rate in the Appalachian plateaus by using cave-sediment magnetostratigraphy.** *Geology*, v. 23, n. 4, 1995, 415-118 p.

SASOWSKY, I.D. **Clastic sediments in caves – imperfect recorders of processes in karst.** *In: SASOWSKY, I.D. Time in Karst. Postojna: Karst Water Institute Special Publication. 2007, 147-149 p.*

SCHÖLL, W.U. **Sedimentologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco.** *In: CONG. BRAS. GEOL., XLV, 1976, Ouro Preto. Anais. Ouro Preto: SBG, v.2. 1976, 207- 232 p.*

SELBY, M.J. **Hillslope Materials and Processes.** Oxford University Press, Oxford. 1993.

SEE. Sociedade Excursionista Espeleológica. **Mapa topográfico Gruta Irmãos Piriás.** 4C BCRA. 1969.

SHINZATO, E. **O Carste da Área de Proteção Ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na Formação dos Solos.** Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos de Goytacazes. 1998.

SILVA, C. M. T., SIMÕES, P. R., PEREIRA FILHO, M. e CRUZ, L. V. **Geoespeleologia da Gruta Gruta dos Piriás (MG 823), Matozinhos MG.** *In: Anais*

do 27º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE. Januária, julho de 2003.

SPRINGER, G. S.; KITE, J. S.; SCHMIDT, V. A. **Cave sedimentation, genesis, and erosional history in the Cheat River Canyon, West Virginia.** Geological Society of America Bulletin, v. 109, n. 5, 1997, 524-532 p.

STOCK, G. M.; GRANGER, D. E.; SASOWSKY, I. D.; ANDERSON, R. S; FINKEL, R. C. **Comparison of U-Th, paleomagnetism and cosmogenic burial methods for dating caves: Implications for landscape evolution studies.** Earth and Planetary Science Letters, v.236, 2005, 388-403 p.

SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia.** São Paulo, Edgar Blücher; Editora da Universidade de São Paulo (USP). 1973.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra.** São Paulo, Oficina de Textos. 2001.

TORRES, T., ORTIZ, J. E.; COBO, R. **Features of deep cave sediments: their influence on fossil preservation.** Estudios Geol., v. 59, 2003, 195-204 p.

TULLER, M. P.; RIBEIRO, J. H.; DANDERFER F. **A Geologia da região de Lagoa Santa e Sete Lagoas.** In: Projeto VIDA, CPRM, Belo Horizonte. Relatório Técnico. 1992.

VALEN, V. e LAURITZEN, S. E. **The sedimentology for Sirijorda Cave, Nordland, northern Norway.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY (10), 1989 (Budapest). Proceedings. UIS. 1989, 125-126 p.

WALKER, R. G. **Facies models - Response to sea change.** Ontario, Geological Association of Canada. 1992.

WEBB, J. A.; FABEL, D.; FINLAYSON, B. L.; ELLAWAY, M.; SHU, L.; SPIERTZ, H. P. **Denudation chronology from cave and river terrace levels: the case of the Buchan Karst, southeastern Australia.** Geological Magazine. v. 129, nº 3, 1992, 307-317 p.

WILLIAMS. P. W. **Subcutaneous hydrology and the development of dolines and cockpit Karst.** Z. Geomorph N. F. 29; 4, 1985, 463-482 p.

WALSH, K. **The Archaeology of Mediterranean Landscapes.** Human-Environment from the Neolithic to the Roman Period. Cambridge University Press. 2013.

WALTER, H. V. **The pre-history of the Lagoa Santa region.** Belo Horizonte: Velloso & Cia. Ltda. 1948, 165 p.

WHITE, E. L. e WHITE, W. B. **Dynamics of sediment transport in limestones caves.** NSS Bulletin. v. 30, nº 4, 1968, 115-129 p.

WHITE, W. B. **Geomorphology and hidrology of Karst Terrains.** 1ª ed. Oxford: University Press. 1988, 464 p.

WHITE, W. B. **Cave sediments and paleoclimate.** Journal of Cave and Karst Studies. v. 69, nº 1, 2007, 76-93 p.

## 8. ANEXO 1

Tabela 1 – Matriz de dados gerados a partir das análises descritiva, de textura e química das fácies levantadas nas Grutas da Escada e Irmãos Piriás.

Caverna	Coluna / Seção	Fácies	Cor	Estruturas	Contato fácies superior e/ou inferior	Consistência	Porosidade	Cimentação	Textura: percentual granulométrico				Características fração areia			Análise química									
									areia grossa (2 - 0,2mm)	areia fina (0,20 - 0,05mm)	silte (0,05 - 0,002mm)	argila (< 0,002)	Morfologia	Seleção	Observações	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% TiO <sub>2</sub>	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% Na <sub>2</sub> O	% K <sub>2</sub> O	% MnO
GE	1	A	10YR 6/8 amarelo acastanhado	Granular	Abrupto	Macia	Baixa	Ausente	30,95%	15,64%	12,48%	40,93%	Arredondados à subangulosos	Mal	Quartzo, ferro e manganês.	54,3	21,1	9,74	1,75	0,38	1,14	0,2	<0,1	0,53	0,04
GE	1	B	10YR 6/8 amarelo acastanhado	Prismática	Abrupto	Dura	Ausente	Ausente	8,95%	14,41%	23,27%	53,37%	Arredondados à subangulosos	Moderada	Quartzo, ferro e manganês.	45,9	29,1	8,87	1,71	0,52	1,68	0,25	<0,1	0,77	0,08
GE	1	C	5YR 5/8 vermelho amarelado	Prismática	Abrupto	Macia	Baixa	Ausente	0,98%	31,28%	21,65%	46,09%	Arredondados	Bem	Quartzo, ferro, manganês e fragmentos metapelito.	39,4	33,8	11,1	0,19	0,27	1,84	0,17	<0,1	0,31	0,04
GE	1	C	7.5YR 7/6 amarelo avermelhado	Laminar	Abrupto	Muito dura	Ausente	Ausente	1,16%	2,29%	27,82%	68,73%	Arredondados	Bem	Quartzo, ferro, manganês e fragmentos metapelito.	39,4	33,9	10,7	0,26	0,3	1,85	0,19	<0,1	0,37	0,04
GE	1	D	7.5YR 6/8 amarelo avermelhado	Granular	Abrupto	Macia	Baixa	Ausente	14,56%	5,56%	17,04%	62,84%	Bem arredondados à arredondados	Mal	Quartzo, ferro, manganês e fragmentos metapelito.	41,1	31	11,2	0,65	0,4	1,64	0,3	<0,1	0,63	0,11
GE	1	E	10YR 6/6 amarelo acastanhado	Laminar	Gradual	Macia	Baixa	Ausente	2,82%	22,98%	57,53%	16,67%	Subangulosos à subarredondados	Muito bem	Quartzo, ferro e manganês.	58	18,4	9,69	2,47	0,75	1,12	0,93	<0,1	1,41	0,33
GE	1	F	10YR 5/8 marrom amarelado	Laminar	Gradual	Muito dura	Baixa	Ausente	9,55%	12,20%	29,92%	48,33%	Bem arredondados à subarredondados	Bem	Quartzo, manganês e ferro (pontual).	46,6	27	11,1	1,68	0,66	1,45	0,55	<0,1	1,06	0,29
GE	1	F*	10YR 5/6 marrom amarelado	Laminar	-	-	-	-	9,13%	7,09%	17,91%	65,87%	Arredondados à subangulosos	Mal	Quartzo, ferro e manganês (nódulos).	33,4	26	15,6	5,74	0,64	1,23	0,42	<0,1	0,91	1
GE	1	G	2.5Y 6/8 vermelho claro	Laminar	Gradual	Muito dura	Ausente	Presente	12,93%	3,96%	39,46%	43,65%	Bem arredondados à subarredondados	Moderada	Quartzo	41,8	22,9	8,99	7,46	1,26	1,21	0,78	<0,1	1,76	0,2
GE	2	H	7.5YR 5/6 marrom escuro	Granular	Abrupto	Solta	Moderada	Ausente	27,36%	5,20%	19,68%	47,76%	Angulosos à subangulosos	Bem	Quartzo, ferro, manganês e fragmentos calcário e metapelito.	50,1	21,2	13	1,46	1,02	1,1	0,62	<0,1	1,07	0,51

Caverna	Coluna / Seção	Fácies	Cor	Estruturas	Contato fácies superior e/ou inferior	Consistência	Porosidade	Cimentação	Textura: percentual granulométrico				Características fração areia			Análise química									
									areia grossa (2 - 0,2mm)	areia fina (0,20 - 0,05mm)	silte (0,05 - 0,002mm)	argila (< 0,002)	Morfologia	Seleção	Observações	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% TiO <sub>2</sub>	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% Na <sub>2</sub> O	% K <sub>2</sub> O	% MnO
GE	2	H*	7.5YR 6/6 amarelo avermelhado	Granular	Gradual	Macia	Moderada	Ausente	18,93%	11,46%	23,73%	45,88%	Arredondados à subangulosos	Moderada	Quartzo, ferro, manganês e fragmentos calcário e metapelito.	48,9	23,3	11,9	1,38	1,02	1,24	0,64	<0,1	1,18	0,39
GE	2	I	7.5YR 6/8 amarelo avermelhado	Laminar	Abrupto	Muito dura	Ausente	Ausente	1,97%	3,48%	51,13%	43,42%	Subangulosos à arredondados	Moderada	Quartzo, ferro, manganês e fragmentos calcário e metapelito.	49,3	23,4	9,68	1,27	1,27	1,28	0,65	<0,1	1,49	0,25
GE	2	J	7.5YR 5/8 marrom escuro	Granular	Abrupto	Solta	Moderada	Ausente	6,36%	9,26%	41,72%	42,66%	Arredondados à subarredondados	Bem	Quartzo, ferro, manganês, fragmentos de calcário e osso (pequeno).	44	22,8	9,42	5,1	1,37	1,24	0,75	<0,1	1,34	0,24
GE	3	K	-	Granular	Abrupto	Muito dura	Ausente	Presente	-	-	-	-	Angulosos à subarredondados	Muito mal	Clastos de quartzo tamanho seixo à calhau cimentados por carbonato de cálcio.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IP	2	A	-	Granular	Abrupto	Muito dura	Baixa	Presente	-	-	-	-	Angulosos à subarredondados	Muito mal	Clastos de quartzo tamanho seixo à calhau cimentados por carbonato de cálcio.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IP	2	B	2.5Y 7/3 amarelo pálido	Laminar	Abrupto	Macia/Plástica	Baixa	Ausente	14,22%	36,95%	29,04%	19,79%	Angulosos à subangulosos	Bem	Quartzo, ferro (nódulos), fragmento metapelito.	68,3	17	3,48	0,6	0,34	0,71	0,07	<0,1	2	0,03
IP	2	B*	10YR 7/4 marrom muito pálido	Granular	Abrupto	Ligeiramente dura	Baixa	Presente	23,44%	28,32%	27,72%	20,52%	Angulosos à subangulosos	Moderada	Quartzo, ferro e manganês (pontual), fragmento metapelito.	68,4	16,4	4,12	1,12	0,54	0,6	0,21	0,16	2,37	0,05
IP	3	B	10YR 6/2 castanho claro acinzentado	Laminar	Gradual	Macia	Baixa	Ausente	0,37%	33,56%	37,48%	28,59%	Angulosos à subangulosos	Bem	Predomínio de clastos tamanho areia de quartzo e pontos pretos (manganês).	63,5	22	3,85	0,39	0,4	0,79	0,09	0,11	2,04	0,02
IP	3	B*	10YR 7/6 amarelo	Granular	Abrupto	Macia	Moderada	Ausente	13,38%	46,02%	23,93%	16,67%	Angulosos à subangulosos	Mal	Clastos de quartzo, ferro.	65,5	18,8	5,17	0,36	0,47	0,57	0,1	0,39	2,26	0,05

