UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PLANALTO CARBONÁTICO DO ANDRÉ LOPES (SP):
GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA E GEOESPELEOLOGIA DA GRUTA DA
TAPAGEM (CAVERNA DO DIABO)**

Bruna Medeiros Cordeiro

Orientador: Prof. Dr. William Sallun Filho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PLANALTO CARBONÁTICO DO ANDRÉ LOPES (SP):
GEOMORFOLOGIA CÂRSTICA E GEOESPELEOLOGIA DA GRUTA DA
TAPAGEM (CAVERNA DO DIABO)**

Bruna Medeiros Cordeiro

Orientador: Prof. Dr. William Sallun Filho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
2013

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Cordeiro, Bruna Medeiros

Planalto carbonático do André Lopes (SP):
geomorfologia cárstica e geoespeleologia da Gruta
da Tapagem (Caverna do Diabo) / Bruna Medeiros
Cordeiro. - São Paulo, 2013

95 p.: il + 3 mapas anexos

Dissertação (Mestrado): IGc/USP

Orient.: Sallun Filho, William

1. Geomorfologia cárstica 2. Serra do André Lopes
3. Gruta da Tapagem 4. Geoespeleologia I. Título

*Dedico este trabalho à minha irmã Lívia Medeiros
Cordeiro e aos meus pais Claudia de Medeiros e Celso
Alberto da Cunha Cordeiro.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Prof. Dr. William Sallun Filho pela orientação, amizade e paciência.

Ao programa de pós-graduação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo e ao Programa de Geoquímica e Geotectônica pela oportunidade e apoio concedido.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de mestrado.

À Pró-reitoria de Pós-graduação da USP pela ajuda financeira e apoio da CPG e programa de pós (IGC-USP) que fizeram concretizar a oportunidade de apresentação de trabalho no 1º GeoCPLP 2012 realizado na Universidade de Coimbra, Portugal.

Ao Prof. Dr. Ivo Karmann pela colaboração no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Paul Williams pelas discussões durante trabalho de campo na Gruta da Tapagem.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto através do Auxílio à Pesquisa “Geologia e Geomorfologia da Serra do André Lopes (SP)” (processo 11/10822-2) em nome de William Sallun Filho.

À Comissão Técnico Científica – COTEC, do Instituto Florestal, pela autorização para realizar os trabalhos na área do Parque Estadual da Caverna do Diabo e APA Quilombos do Médio Ribeira.

Ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas-CECAV pela autorização de coleta de pesquisa.

Aos gestores do Parque Estadual da Caverna do Diabo, Josenei Cara e Mayra Jankowsky pela atenção e disposição e ao Josias Pereira (membro fundamental da equipe de campo). A todos os monitores da Caverna do Diabo que, de alguma forma,

colaboraram com os trabalhos de campo: Juliane Jamile da Silva Pereira, Waldomiro Pereira, Ládio dos Santos Furquim e Fabrício de Oliveira Mendes.

Ao Aristides do restaurante da Kaverna, pelo apoio e deliciosos pratos.

À Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) por meio do PROCAD, ao Roberto Rodrigues e Fabio Geribello, por fornecerem gentilmente o mapa e a base de dados da Caverna do Diabo e a todos os colaboradores do PROCAD que indiretamente contribuíram com esta pesquisa.

Aos espeleólogos Marcos Silvério, Daniel Menin e Roberto Brandi pelo apoio no trabalho de campo realizado na Rede Gava e fornecimento de material fotográfico.

Lembrança especial à Família Bandeira (José, Lindamir e Richard) pelas longas conversas a beira do fogão a lenha e apoio inestimável durante os trabalhos realizados nas regiões mais longínquas da Serra do André Lopes.

Aos meus pais Claudia Medeiros e Celso Cordeiro por estarem sempre presentes nos momentos mais difíceis e felizes de minha vida.

A minha irmã Lívia Medeiros Cordeiro e ao Rodrigo Borghezan pelas vivências e aventuras cavernícolas.

À Alessandra Dumond, Alberto Verão Viana e à família Tupinambara por me apoiarem nesta caminhada.

As minhas queridas e amadas “Capitãs do Mato”, Juliana Freitas, Josevânia Ibanhez, Camila Pagotto e Julia N. Cordeiro, pela amizade e companheirismo.

Ao meu amigo e companheiro que fez parte desta etapa da minha vida Victor Hugo da Silva Gomes Mariusso.

Dedico um agradecimento especial ao amigo Luiz Bernardino (o heremita das cavernas) e as minhas parceiras do HAZE – Trash Metal.

*In the real darkness, where the light never touch
In a eternal unwaring silence, where the birds are not heard
The water went through it ways under ground
Opening your glorious tunnels with ornamented roofs*

Living in the cave... Living in the cave

*Some creatures are surviving there for a million years
They went from the epigean world, but they choose the cave!
Repulsive creatures, feared, are inspiration for tales
Only the sound, the bat that arrive to take the rest*

Living in the cave... Living in the cave

*Animals that lose the eyes
Animals that became white
Animals that live in the eternity
For million and million years...*

By Haze - trash metal

RESUMO

A Serra do André (SAL) Lopes constitui um planalto carbonático de natureza dolomítica desenvolvido no Mármore da Tapagem (Grupo Açungui - Mesoproterozoico) localizada no alto vale do rio Ribeira de Iguape, sul do Estado de São Paulo. Constitui uma das áreas cársticas menos estudadas da região do ponto de vista geomorfológico e geoespeleológico. Dentre as feições mais notáveis estão o Vale Cego da Tapagem, a Gruta da Tapagem (Caverna do Diabo), grandes depressões poligonais e depósitos de tufas. Este trabalho buscou o entendimento da configuração do relevo cárstico da SAL a partir de um mapeamento morfológico de detalhe baseado em fotointerpretação, modelos de terreno, morfometria e zoneamento morfológico. O estudo geoespeleológico da Gruta da Tapagem foi feito a partir da investigação morfológica em planta e seção transversal, correlacionando com a estrutura geológica e topografia. A área cárstica ocupa 46,11% do mármore, o restante é dominado por processos fluviais típicos. O sistema apresenta recarga hidrológica mista, porém em sua maior parte autogênica (82%). A água do carste é drenada por bacias distintas, que têm o rio Pardo como nível de base, no setor sudoeste e o rio Ribeira no setor nordeste da lente carbonática. A análise na escala 1:25.000 permitiu identificar três unidades morfológicas, os vales fluviais, o carste poligonal e o vale cego da Tapagem. O carste poligonal é a feição predominante, em planta constitui um mosaico de polígonos composto por 53 depressões poligonais, em geral amplas e delimitadas por divisores e cones cársticos. Representam a fonte de recarga do aquífero cárstico que drena em direção as unidades de vales fluviais instaladas sobre o mármore. As direções predominantes NE-SW e NW-SE, bem marcadas nas redes de drenagem, arranjo espacial das depressões fechadas, estão relacionadas, respectivamente, aos planos de foliação do mármore e aos diques básicos mesozóicos e fraturas associadas. A dissecação do relevo e o desenvolvimento da porosidade secundária do mármore se deram de forma mais intensa na área que tem o rio Ribeira como nível de base. Neste setor se desenvolvem vales mais entalhados, depressões de maior amplitude e feições marcantes como o vale cego do rio Tapagem. O vale cego sugere uma captura de drenagem pelo desenvolvimento da Gruta da Tapagem em direção ao vale fluvial do rio das Ostras, acarretando no entalhamento de um sistema subterrâneo ímpar no planalto carbonático. A Gruta da Tapagem está inserida no flanco noroeste da sinforma do mármore e localmente ocorre um anticlinal, onde próximo do sumidouro as camadas mergulham para NW e do meio para ressurgência para SE. Quimicamente os carbonatos da caverna foram classificados como dolomitos e dolomitos calcíticos. Quatro diques de diabásio mesozóicos cortam a caverna de forma quase perpendicular e foram rompidos durante sua evolução. A caverna apresenta uma morfologia meandrante em planta, com 1,3 de sinuosidade, e predomínio de cânions subterrâneos vadosos e salões de abatimento, em seção transversal. Os dados estruturais indicam que o condicionamento estrutural da caverna se dá principalmente pelo bandamento do mármore, fraturas NW-SE, pelo gradiente hidráulico regional e por mudanças pontuais no gradiente hidráulico geradas por obliteração do conduto a partir de processos de abatimento.

Palavras-chave: Serra do André Lopes, Geomorfologia Cárstica, Geoespeleologia, Gruta da Tapagem

ABSTRACT

The Serra do André Lopes (SAL) constitutes a carbonate dolomitic plateau developed in Tapagem Marble (Açungui Group - Mesoproterozoic) located in the upper valley of the Ribeira de Iguape River, in the south of the State of São Paulo. It is one of the least studied karst areas in the region. Its most notable features include the Tapagem Blind Valley, the Tapagem Cave (Devil's Cave), extensive polygonal depressions and tufa deposits. This study sought to understand the configuration of the karst landforms of the SAL through detailed morphological mapping based on photointerpretation, terrain models, morphometry and morphological zoning. The geospeleological study of the Tapagem Cave was conducted based on a plan view and cross-section morphological investigation, correlating this with geological structure and topography, on which this study also focused. The karst area occupies 46.11% of the marble, the remainder being dominated by typical fluvial processes. The system shows mixed hydrological recharge, although most of this is autogenic (82%). The karst water is drained by different basins, which have the Pardo River as a base level in the southwestern sector, and the Ribeira River in the northeastern sector of the carbonate body. Analysis on a scale of 1:25,000 made it possible to identify three morphological units, namely: river valleys, the polygonal karst and the Tapagem blind valley. The polygonal karst is the predominant feature, constituting, in plan view, a mosaic of polygons composed of 53 polygonal depressions, generally ample and delimited by water divides and karst cones. These represent the source of recharge of the karst aquifer, which drains in the direction of river valley units installed upon the marble. The predominant directions of NE-SW and NW-SE, well marked in drainage networks and the spatial arrangement of closed depressions are related, respectively, to marble foliation planes and basic Mesozoic dikes and associated fractures. Dissection of the landscape and development of secondary porosity of the marble came about in a more intense manner in the area that has the Ribeira River as its base level. In this sector, more deeply cut valleys developed, as well as depressions of greater amplitude and such notable features as the blind valley of the Tapagem River. The blind valley suggests drainage capture through development of the Tapagem Cave, in the direction of the Ostras River valley, resulting in the carving out of an unmatched subterranean system on the carbonate plateau. The Tapagem Cave lies on the northwestern flank of the marble synform and, locally, an anticline occurs where, in the vicinity of the sinkhole, layers dip to the NW and from the middle for resurgence to the SE. Chemically, the cave carbonates were classified as dolomites and calcareous dolomites. Four Mesozoic diabase dikes cut through the cave in an almost perpendicular manner and were ruptured during their evolution. In plan view, the cave shows meandering morphology, with a sinuosity of 1.3, and a predominance of vadose underground canyons and breakdown chambers, in transverse section. The data indicate that the cave structure is principally conditioned by banding of the marble and NW-SE fractures, as well as the regional hydraulic gradient and localized changes in the hydraulic gradient generated by obliteration of the conduit as a result of subsidence processes.

Keywords: Serra do André Lopes, Karst Geomorphology, Geospeleology, Tapagem Cave

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Área de estudo	3
1.3 Geologia regional	4
1.4 Contexto geomorfológico	9
2 MATERIAIS E MÉTODOS	13
2.1 Geomorfologia cárstica	13
2.1.1 Organização da base cartográfica	13
2.1.2 Fotointerpretação	14
2.1.3 Perfis e análise morfométrica.....	15
2.1.4 Análise do relevo em campo e sobrevôo.....	16
2.1.5 Zoneamento morfológico.....	20
2.2 Gruta da Tapagem.....	20
2.2.1 Organização do mapa e base de dados.....	20
2.2.2 Trabalhos de campo	21
2.2.3 Obtenção de dados geológicos e estruturais.....	22
3 GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA.....	23
3.1 Setor Claro – CPc e VFc.....	28
3.2 Setor Frias – CPf e VFf.....	33
3.3 Setor Arivá - CPa	38
3.4 Setor Tapagem/Ostras – VFo, VCt e CPto.....	39
3.4.1 Relação entre as unidades VCt e VFo.....	42
3.5 Setor Sapatú – CPs	46
4 GRUTA DA TAPAGEM.....	50
4.1 Aspectos históricos	50
4.2 Aspectos fisiográficos da área de recarga.....	53
4.3 Arcabouço geológico e estrutural.....	54
4.4 Morfologia.....	60
4.4.1 Setor Turístico, Rede Gava e Salão Erectus (A)	62
4.4.2 Galeria do rio (B).....	66
4.4.3 Salões de abatimento (C).....	69
5 DISCUSSÃO.....	72
5.1 Compartimentação e evolução do relevo cárstico	72
5.2 Gruta da Tapagem	80
6 CONCLUSÕES.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.....	4
Figura 2: A- Mapa geológico e perfis da área de estudo; B- Faixas carbonáticas do Grupo Açunguí, detalhe em vermelho indicando a localização da Faixa André Lopes (baseado em Campanha, 2002). Mapa geológico e perfil A-B adaptado de Faleiros et al. (2012) e Faleiros et al. (2013); perfil C-D de Silva et al. (1981).....	8
Figura 3: Contexto geomorfológico da área de estudo. A- Províncias morfoesculturais; B- Unidades Morfoesculturais (A e B, baseados em mapa em escala 1:500.000 de Ross e Moroz (1997), e detalhamento do Planalto da Tapagem segundo Campanha et al. (1985), escala 1:50.000); C- Mapa hipsométrico baseado em SRTM.....	12
Figura 4: Fluxograma da metodologia e os dados utilizados para os estudos geomorfológicos.....	13
Figura 5: Articulação das faixas aerofotogramétricas utilizadas para o mapeamento da área cárstica.....	15
Figura 6: Mapa de caminhamentos, pontos de campo e algumas localidades principais. Base: imagem Rapideye (obtida em 2009).....	17
Figura 7: Logística de campo nos trabalhos de campo na região do Descampado. A- Transporte em animais; B- Casa utilizada como base de campo.....	18
Figura 8: Rota de sobrevôo. O amarelo refere-se a numeração da fotografias e localização da direção de visadas. Base: imagem Rapideye (obtida em 2009).....	19
Figura 9: Fluxograma da metodologia e os dados utilizados para o estudo da Gruta da Tapagem.....	20
Figura 10: Trabalhos de campo na Gruta da Tapagem. A- Percurso na galeria do rio; B- Elaboração do perfil longitudinal; C- Acampamento subterrâneo e E- Trabalhos com corda na Rede Gava (Foto: Marcos Silvério).....	22
Figura 11: Mapa geomorfológico simplificado, com a localização dos perfis topográficos e identificação das bacias poligonais.....	25
Figura 12: Perfis topográficos da Serra do André Lopes, com indicação dos compartimentos morfológicos e rios principais.....	26
Figura 13: Setor Claro. A – MDT do Setor Claro com a indicação das unidades de relevo e das visadas fotográficas de B e C; B- visão oblíqua do VFc com indicação do ponto de saída do rio Claro do Planalto (I); C- visão oblíqua do CPc, (m) metapelitos.....	29
Figura 14: Feições de relevo do Setor Claro. A- Dolinas de dissolução indicadas pela seta vermelha; B- sumidouro instalado em leito de canal fluvial; C- Fundo de depressão plano e colmatado com preenchimento aluvial; D- Tufa; E- Perfil longitudinal do rio Claro com valores de gradiente hidráulico e indicação de D e F; F- Tufa a montante da	

confluência como rio Frias. (D, E e F modificados de Sallun Filho et al., 2012b e Almeida, 2011).....31

Figura 15: Setor Frias. A- MDT com indicação das visadas de B e C; B- Vista a SW do setor Frias com indicação do canal drenando a SW, encaixado na zona de contato. O círculo rosa indica o cotovelo do rio Frias na saída do planalto controlado por lineamento; C- Vista a NE do VF.....34

Figura 16: Feições de relevo no setor Frias. A e B- sumidouro e ressurgência em depressão poligonal nas cabeceiras do rio das Pedras; C- afloramento do mármore com feições de lapiás; D- Rio das Pedras correndo sobre depósito aluvial entalhando o terraço a direita da foto; E- rio Frias no planalto; F- rio frias fora do planalto; G- perfil longitudinal do rio Frias com indicação de E e F.....37

Figura 17: Setor Arivá. A- MDT do Setor Arivá e B- Depósito ativo de tufas no rio Arivá, na saída do planalto.....39

Figura 18: Setor Tapagem/Ostras. A- MDT com unidades de relevo e indicação da visada fotográfica de B; B- Vista oblíqua do VCt, a seta azul indica o percurso do rio Tapagem, (MT) Mármore da Tapagem e (m) metapelitos.....41

Figura 19: Perfis dos rios Ostras e Tapagem. A- Perfil do rio das Ostras com indicação de mudanças no gradiente hidráulico. B – Relação entre o perfil longitudinal dos rios Tapagem e Ostras, com a indicação do sumidouro e da ressurgência do rio Tapagem. Neste caso o perfil do rio Tapagem foi traçado seguindo a continuidade do vale até o Ribeira, a fim de destacar o divisor topográfico que foi desenvolvido a partir da instalação do sumidouro; C- Planta esquemática da captura do rio Tapagem.....44

Figura 20: Carste Poligonal do Sapatú. A- MDT com indicação das visadas fotográficas de B e C; B- Visão oblíqua das depressões poligonais do CPs, formando uma grande depressão composta; C- Crista carbonática da vertente norte, ao fundo o rio Ribeira.....48

Figura 21: Evolução dos mapas da Gruta da Tapagem. A- Le Bret (1966); B- SBE (1993); C- SBE (2008), utilizado neste estudo.....52

Figura 22: Mármore na Gruta da Tapagem. A- Dobra intrafolial do bandamento composicional em bloco no leito do rio; B- Fotomicrografia do mármore dolomítico com textura granoblástica e granulação fina, com polarizadores descruzados; C- Protoconduto na galeria do rio condicionado pelo plano do bandamento do mármore; D- Detalhe da Figura 21C, mostrando o aspecto do bandamento e granulação grossa (cristais milimétricos) do mármore.....55

Figura 23: Diques de diabásio encontrados na Gruta da Tapagem. I- Dique 1; II- Dique 2 (escala humana marcada com seta); III- Dique 3; IV- Dique 4.....56

Figura 24: Estereograma com os pólos das medidas estruturas da Gruta da Tapagem (bandamento, diques e fraturas).....57

Figura 25: Planta simplificada da Gruta da Tapagem, com as estruturas observadas.....58

Figura 26: Perfis topográficos longitudinal (A) e transversal (B) da bacia e da Gruta da Tapagem.....	59
Figura 27: Vista do vale do rio Tapagem com indicação do sumidouro e dos morros e cristas sobre a Gruta da Tapagem (vista de SW a NE).....	60
Figura 28: Sumidouro da Tapagem (setor turístico) (Perfil 1-Anexo 3).....	61
Figura 29: Planta da caverna e compartimentos morfológicos.....	61
Figura 30: Setor Turístico. A- Início da subida do primeiro salão da caverna no Setor Turístico. Nota-se a grande quantidade de blocos e espeleotemas abatidos. Próximo ao perfil 5. B- Grande coluna inclinada (deslocada) por erosão do piso no Setor Turístico; C- Grande coluna no Setor Turístico.....	63
Figura 31: Grande depósito de sedimento colúvio-eluvial provenientes de abertura no teto da caverna. A seta amarela indica um espeleotema do tipo “vela” de quase 18m de altura depositado sobre o “Bolo de Noiva”. Setor Turístico (perfil 8).	64
Figura 32: Salão Erectus e Rede Gava. A- Setor do Salão Erectus rico em estalagmites e estalactites (perfil 6); B- Depósito fluvial no Salão Erectus, material grosseiro com seixos alóctones e autóctones e matriz argilo-arenosa; C- Trecho da Rede Gava que conecta com a Galeria do Rio. No teto feições de <i>scallops</i> na base da foto sedimento fluvial (perfil 10).....	65
Figura 33: Morfologia da Galeria do Rio. A- Galeria do rio próximo à entrada da caverna (Setor Turístico). Do lado esquerdo da foto a seta amarela indica marca de nível da água (perfis 2, 3 e 4, entre as bases $\Delta 2$). B - Cânion na galeria do rio, com bandamento do mármore verticalizado (perfil 12, entre as bases $\Delta 4$ e $\Delta 5$); C - Base do cânion com a Rede Gava na porção superior (próximo ao perfil 10 e bases $\Delta 4$)..	67
Figura 34: A- Cânion na galeria do rio com inclinação conforme o bandamento do mármore, próximo (perfil 29, próximo a base $\Delta 24$); B - Depósito de terraço fluvial em nível superior, entre 30 a 40m acima do nível da água atual (fim do Setor Turístico); C- Espeleotema tombado na galeria do rio por erosão e solapamento da base (próximo ao $\Delta 10$).....	68
Figura 35: Setor C. A- Vista do Salão dos Gigantes Caídos a partir do Salão Michel (perfil 26, entre as bases $\Delta 14$ e $\Delta 15$); B- Perfil de conduto alterado, Salão Philippe; C- leito abandonado do rio sob abatimento de blocos próximo ao salão Gigantes Caídos; D- Passagem triangular da galeria do rio no Setor C (perfil 26).....	70
Figura 36: Esquema conceitual do escoamento superficial e da direção das linhas de fluxo subterrânea dos sistemas cársticos da Serra do André Lopes.....	72
Figura 37: Rosácea das direções dos eixos maiores das bacias poligonais.....	74
Figura 38: Comparação das texturas do carste poligonal de diferentes unidades carbonáticas do alto vale do Ribeira.....	77

Figura 39: Modelo espeleogenético “Four State Model”. Modelo evolutivo de uma caverna nas dimensões de comprimento e profundidade. Retirado de Ford, D.C (2000).....82

Figura 40: Morfologia em seção transversal da Gruta da Tapagem. Representação das seções com a atitude das estruturas geológicas (E.L.I – entalhamento lateral intenso).....84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Subdivisão das unidades morfológicas.....	24
Tabela 2: Índices gerais do carste da Serra do André Lopes.....	24
Tabela 3: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Claro.....	32
Tabela 4: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Frias.....	36
Tabela 5: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Arivá.....	38
Tabela 6: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal da Tapagem.....	45
Tabela 7: Índices morfométricos do Vale Cego do rio Tapagem.....	46
Tabela 8: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Sapatú.....	49
Tabela 9: Fluxo de visitantes na Caverna do Diabo (Lobo et al., 2010).....	51
Tabela 10: Características dos diques de diabásio encontrados na Gruta da Tapagem.....	56
Tabela 11: Índices dos setores da unidade de Carste Poligonal.....	75
Tabela 12: Índices dos vales fluviais.....	75
Tabela 13: Comparação de índices morfométricos da SAL com outras áreas cársticas do vale do Ribeira e Paranapanema.....	78

ANEXOS

- 1- Mapa geomorfológico do carste da Serra do André Lopes
- 2- Mapa Geoespeleológico e Perfis Transversais da Gruta da Tapagem
- 3- Perfis transversais e longitudinal da Gruta da Tapagem

1 INTRODUÇÃO

A região do Alto Vale do rio Ribeira, localizada no sudeste paulista, é conhecida pela ocorrência de sistemas de cavernas e paisagens cársticas. Os terrenos cársticos se desenvolvem em áreas ocupadas por rochas carbonáticas, onde há a formação de aquífero de condutos que se desenvolvem devido à alta solubilidade da rocha sobre a ação geológica de águas superficiais e subterrâneas, resultando na formação de sistemas de cavernas e feições de relevo peculiares. O termo “karst” (ou carste em português) é proveniente de uma região da Eslovênia, conhecida localmente como “*kras*” ou campo pedregoso (Gams, 1993).

Tratando-se de Brasil, 2% (Auler et al., 2001) a 2,8% (Sallun Filho e Karmann, 2013) do território nacional é ocupado por rochas carbonáticas, que constituem as principais hospedeiras de sistemas cársticos. No alto vale do Ribeira, as áreas cársticas se desenvolvem sobre rochas meso a neoproterozoicas do Grupo Açungui, que correspondem a apenas 2,4% do total de rochas carbonáticas do Brasil (Sallun Filho e Karmann, 2013). A região é conhecida desde o final do século XIX através das explorações realizadas por Richard Krone, naturalista alemão que, apesar do intuito de encontrar material arqueológico e paleontológico, acabou ressaltando a relevância científica da região registrando diversas cavernas e sua localização (Krone, 1898).

Atualmente o alto vale do rio Ribeira é considerado uma das regiões cársticas que apresentam o maior grau de conhecimento científico e exploratório do Brasil, com um grande acervo de mapas de cavernas elaboradas por grupos espeleológicos e de mapas específicos das áreas cársticas (Karmann e Sánchez, 1986; Marinho, 1989; Karmann, 1994). Porém, a faixa carbonática André Lopes possui apenas poucos estudos com o intuito de enriquecer o conhecimento geológico/geomorfológico da região, sendo eles: Hiruma (2008); Sallun Filho et al. (2011); Almeida (2011); Sallun Filho et al. (2012a); Sallun Filho et al. (2012b); Cordeiro et al. (2012).

Na faixa André Lopes se localiza a Gruta da Tapagem, também conhecida como Caverna do Diabo, é a segunda caverna a ser registrada no Estado de São Paulo (SP-02), uma das primeiras do Brasil e uma das cavernas com o uso turístico mais antigo do país. A Gruta da Tapagem foi durante muito tempo uma das maiores cavernas do Brasil, e atualmente está entre as maiores caverna do Estado de São Paulo e uma das 20 maiores cavernas do país (Auler et al., 2001). É notório destacar que apesar da região ser de bastante conhecida, nunca havia sido estudada do ponto de vista geológico, ou

seja, apesar da existência da Gruta da Tapagem e de feições cársticas, nenhum estudo específico foi desenvolvido a fim de compreender a organização do sistema cárstico e ocorrência de cavernas na região da Serra do André Lopes.

Os terrenos cársticos são considerados de grande fragilidade ambiental devido à alta capacidade de condutividade da água subterrânea e à instabilidade do terreno, fato que gera uma preocupação quanto ao uso e ocupação do solo. No carste da Serra do André Lopes, praticamente não há ocupação humana, constitui um mosaico de Unidades de Conservação e de comunidades quilombolas. Além disso, a presença de densa floresta de Mata Atlântica protegida por lei, torna esta região de extrema relevância ambiental, somado a presença de um sistema geomorfológico tão sensível.

Diante disso, a área cárstica da Serra do André Lopes foi selecionada como objeto deste trabalho a fim de contribuir com o conhecimento científico e preservação deste importante sistema da região do vale do rio Ribeira. Assim, algumas questões são levantadas, como: Qual é a geometria do sistema cárstico na faixa André Lopes? Quais são as principais bacias hidrográficas e a organização de sua rede de drenagem? Existem mais sistemas de cavernas além da Caverna do Diabo no mármore da Tapagem? Essas questões motivaram a realização dessa pesquisa, no intuito de contribuir para o conhecimento científico entorno dos ambientes cársticos do Alto Ribeira.

Assim sendo, este trabalho foi estruturado em duas etapas. No primeiro capítulo apresentamos o mapeamento morfológico de detalhe e o zoneamento cárstico, com a aplicação de análises morfométricas. Em seguida, no segundo capítulo, foi feito um estudo da morfologia e geologia da Gruta da Tapagem.

1.1 Objetivos

O objetivo geral proposto para este trabalho é a caracterização da morfologia do carste da faixa carbonática André Lopes, buscando determinar a sua geometria atual e fatores condicionantes das formas de relevo, assim como, compreender a morfologia e geoespeleologia da Gruta da Tapagem.

Neste quadro, a pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o mapeamento morfológico do carste, a partir de restituição aerofotogramétrica na escala 1:25.000, com suporte de mapas topográficos

e dados do SRTM, dando enfoque a rede de drenagem, divisores topográficos e feições cársticas;

- Delimitar as zonas de recarga e descarga hidrológica no mármore;
- Compartimentar o relevo cárstico com base nas formas de relevo e na morfometria;
- Complementar o mapeamento topográfico da Gruta da Tapagem a partir da confecção de perfis transversais;
- Analisar a morfologia da Gruta da Tapagem e compreender os seus principais condicionantes geológicos e geomorfológicos.

1.2 Área de estudo

A Serra do André Lopes está localizada na margem direita do alto vale do rio Ribeira de Iguape, abrange terras dos municípios de Eldorado e Barra do Turvo na região sul do Estado de São Paulo, divisa com o Estado do Paraná (Figura 1). A principal via de acesso à região é a rodovia BR-116, em seguida a SP-193 até Eldorado e por fim a SP-165. As vias de acesso ao carste são escassas, existindo apenas a estrada asfaltada que leva ao complexo turístico da Caverna do Diabo e outras três estradas de terra que levam para as áreas Sapatú, Marcos e Mineração Minervale. A antiga estrada ao Descampado não é mais transitável, no demais, o acesso é feito por trilhas a pé ou a cavalo.

Neste trabalho, para facilitar a leitura do texto, a “Serra do André Lopes” será referida pela abreviação SAL.

A região está inserida no denominado “Mosaico de Jacupiranga”, que constitui um dos maiores complexos de reservas de Mata Atlântica do país, composto por três Parques Estaduais: Caverna do Diabo (PECD), do Rio Turvo (PERT) e Lagamar de Cananéia (PELC) e mais onze unidades de conservação de uso sustentável nas categorias APA, RDS e RESEX.

A Serra do André Lopes é composta por áreas densamente florestadas pertencentes ao Parque Estadual da Caverna do Diabo (PECD) e APA Quilombo do Médio Ribeira, além de algumas áreas particulares.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

1.3 Geologia regional

A área de estudo está localizada na Província Mantiqueira, o arcabouço geológico é representada por rochas que registram uma história que vai desde o Pré-Cambriano ao Eopaleozóico, e originou associações migmatíticas, metamórficas e complexos ígneos (Almeida, 1986; Almeida e Carneiro, 1998).

A Província Mantiqueira ou Sistema Orogênico Mantiqueira se estende da costa leste do Brasil até o Uruguai (Almeida et al., 1973). Constitui uma região dobrada com uma história evolutiva que envolve a fragmentação do continente Rodínia e a aglutinação do megacontinente Gondwana, completando um Ciclo de Wilson ou Ciclo Brasileiro Pan-Africano (Heilbron et al., 2004). O final deste processo (Cambro-Ordoviciano) é marcado pela instalação de um sistema falhamentos transcorrentes, que atualmente imprimem a compartimentação da região em blocos tectônicos, com uma variedade litológica e estrutural fruto dessas longas e intensas atividades tectônicas de

magnitude regional (Hasui, 2013). As litologias deste orôgeno são constituídas essencialmente de rochas pré-silurianas (>450Ma) (Almeida, 1977 e Faleiros et al., 2012). Granitos neoproterozoicos afloram na região, formados durante o processo de consolidação da Plataforma-Sul Americana (Almeida e Carneiro, 1998).

Durante a abertura do Oceano Atlântico, no Mesozóico, a passagem da Placa Sul-Americana sobre uma anomalia térmica reativou estruturas mais antigas, e foi acompanhado de eventos intrusivos descontínuos que deram origem ao denominado Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa (Cretáceo-Terciário), fraturas distensivas também foram geradas, sendo estas reativadas durante o Cenozóico (Almeida, 1986). Esta feição geológica é notável, com uma extensão que varia de alguns metros a dezenas de quilômetros. A área de estudo está localizada entre dois lineamentos do Arco de Ponta Grossa, o Lineamento Guapiara e o São Jerônimo-Curiúva (Franco-Magalhães et al., 2010). Os diques de diabásio são compostos basicamente de basaltos toleíticos e eocretáceos de orientação geral N50°E-65°E, que alimentaram os derrames basálticos da Formação Serra Geral (IPT, 1981). Segundo Renne et al. (1996) e Ernesto et al. (1999) as intrusões apresentam uma fase de injeção principal entre $131,4 \pm 0,5$ Ma a $129,2 \pm 0,5$ Ma e máxima probabilidade de 130,5 Ma.

A estruturação regional ENE-WSW controlada pelas falhas e zonas de cisalhamento no embasamento pré-cambriano, foram reativadas como falhas normais no Paleógeno (Eoceno-Oligoceno), dando origem a um corredor de vales tectônicos denominados de Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste Brasileiro (Zalán e Oliveira 2005), representado na área de estudo pelo Graben de Sete Barras (Riccomini, 1995).

O bloco tectônico do qual área de estudos está inserida corresponde a Faixa Dobrada Apiaí (Hasui et al., 1975). A Faixa Apiaí é constituída pelo Supergrupo Açunguí, o qual é composto por rochas supracrustais vulcano-sedimentares de grau metamórfico médio a fraco, com o embasamento constituído por um conjunto de rochas gnáissico-migmatíticas com alguns núcleos charnokíticos e intercalações de metassedimentos, incluindo diversas lentes carbonáticas a dolomíticas, dobradas e falhadas com orientação seguindo estruturação regional NE-SW do Cinturão Orogênico do Atlântico (Campanha et al., 1985) (Figura 2). As rochas carbonáticas da Faixa Apiaí ocorrem sob forma de diversas faixas carbonáticas, são elas a faixa carbonática Itaiacoca, Lageado-Bombas, Furnas-Santana e André Lopes (Karmann, 1994). A área estudada corresponde à faixa André Lopes.

A Segundo a compartimentação tectônica do médio vale do Ribeira realizada por Campanha (1991), a SAL está situada no Bloco Andorinhas, o qual é delimitado por dois lineamentos transcorrentes pré-cambrianos, o Lineamento Ribeira a norte e o Lineamento Lancinha ao sul; já a oeste, o bloco é limitado pelo Empurrão da Figueira.

Este bloco tectônico é representado pela unidade geológica Sequência Serra das Andorinhas, composta pelo Mármore da Tapagem (faixa carbonática André Lopes) e a Formação Setuva, também denominada de Unidade Metapelítica por Faleiros et al. (2012).

O Bloco Andorinhas constitui uma grande estrutura sinformal, com flancos normais na sua porção central e de flanco noroeste invertido na porção sudeste (Figura 2), gerada em evento de deformação inicial durante o final do Mesoproterozóico (aproximadamente entre 1,1 e 1,4 Ga), o qual alterou o acamamento e gerou uma foliação com plano axial a NE-SW (Campanha e Sadowski, 1999). Na sequência estratigráfica, o Mármore da Tapagem assenta-se sob a Unidade Metapelítica com um contato brusco, exceto na porção norte onde o contato se dá com xistos carbonáticos que apresentam intercalações métricas e decimétricas de mármore, sugerindo um contato interdigitado (Campanha, 1991). Segundo Faleiros et al. (2013) este bloco abrange a sequência Serra das Andorinhas, dentro do Grupo Açungui, que é composta de diversas unidades:

- Mármore da Tapagem: apresenta uma natureza mais dolomítica e metamorfismo de maior mais expressivo em relação aos outros corpos carbonáticos do Supergrupo Açungui (Campanha et al., 1985). A estrutura principal consiste de uma laminação (S1) com densidade máxima de dados em torno da atitude N60E/55SE, em raros casos (principalmente na porção sul da unidade), o acamamento sedimentar (S0) pode ser observado, apresentando mergulhos baixos a moderados para N e NW (Faleiros et al., 2013).
- Unidade Metapelítica: Compreende, predominantemente, corpos de filitos e xistos carbonáticos (rochas calcissilicáticas) com intercalações expressivas de quartzo-xisto, quartzito e mármore. A xistosidade é bem desenvolvida e com laminação diferenciada. Localmente, ocorrem filitos com acamamento sedimentar milimétrico preservado e bandamento composicional. Metabasitos são raros, caracterizados

por anfibolito milonítico e quartzo-plagioclásio-clorita-xisto milonítico bandado (Faleiros et al., 2012).

Segundo Faleiros et al. (2013) a Sequência Serra das Andorinhas possui grau de metamorfismo fácies xisto-verde superior a anfibolito e a deposição é atribuída ao Mesoproterozóico.

Os depósitos cenozóicos são representados pelas Formações Sete Barras, Pariquera-Açú. A Formação Sete Barras constitui o preenchimento sedimentar do Gráben de Sete Barras, localizada a sudeste da SAL, representam o mais antigo depósito associado à atividade tectônica cenozóica relacionada ao Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste Brasileiro (Eoceno-Oligoceno) (Morais et al., 1991; Riccomini et al., 2004). A Formação Sete Barras corresponde a depósitos de leques aluviais coalescentes, gradando para depósitos lacustres na porção central da depressão tectônica. A Formação Pariquera-Açu abrange depósitos mais recentes, provavelmente eomiocênicos, compreende depósitos fanglomeráticos de leques aluviais associados a falhas sinsedimentares, gradando lateralmente para depósitos de planície fluvial meandrante e de lagos (Moraes et al., 1991).

Figura 2: A- Mapa geológico e perfis da área de estudo; B- Faixas carbonáticas do Grupo Açunguí, detalhe em vermelho indicando a localização da Faixa André Lopes (baseado em Campanha, 2002). Mapa geológico e perfil A-B adaptado de Faleiros et al. (2012) e Faleiros et al. (2013); perfil C-D de Silva et al. (1981).

1.4 Contexto geomorfológico

A configuração da morfologia regional da área de estudos é extremamente subordinada ao arranjo geológico-estrutural ENE-SSW do Cinturão Orogênico do Atlântico, engloba uma zona de transição entre terras altas desta unidade morfoestrutural e terras baixas da Depressão Tectônica Cenozóica do Baixo Ribeira (Figura 3A).

De acordo com a macrocompartimentação do relevo do território brasileiro de Ross e Moroz (1997), a qual está sendo adotada neste trabalho, a área de estudos faz parte da unidade morfoescultural do Planalto Atlântico. Esta unidade é dividida em unidades menores, das quais a SAL está inserida no Planalto Ribeira/Turvo. Em trabalhos anteriores a área da SAL recebeu outras denominações, como a de Ponçano et al. (1981) que classifica a área como Morros em Área de Sumidouro Circundado por Espigões Digitados, e o Planalto da Tapagem de Campanha et al. (1985), (também referido pelo autor como Serra da Bandeira, Serra das Ostras ou de André Lopes), enquadrada como Remanescentes do Planalto de Guapiara (Figura 3A). Neste trabalho foi adotado Serra do André Lopes por ser o nome adotado para a faixa carbonática e mais comum entre a comunidade local.

Seguindo a descrição de Ross e Moroz (1997), o Planalto Ribeira/Turvo apresenta cotas altimétricas entre 700-800m ou >900m, com declividades dominantes de 20% a 30% e formas de topos aguçados. Ocorrem solos do tipo Cambissolos, Litólicos e Afloramentos Rochosos. A localidade da área de estudos no Planalto Ribeira/Turvo está inserida entre dois modelados dominantes distintos, Da33 e Da44. Esses modelados de relevo se diferem quanto ao grau de dissecação e a fragilidade erosiva. A Da33 apresenta uma dissecação média, com vales entalhados, densidade de drenagem média e alta capacidade erosiva (observe na Figura 3B que o limite entre essas unidades acompanha o contorno da lente carbonática na sua porção sudeste). A unidade Da44 apresenta formas muito dissecadas, com vales bastante entalhados e alta densidade de drenagem, área sujeita a processos erosivos agressivos, como escorregamentos de massa e erosão linear com voçorocas.

A Serra do André Lopes constitui uma área carbonática elevada com cotas entre 330 até 1.010m de altitude. O clima da região é de domínio subtropical úmido, apresenta uma média anual de precipitação de 1.600 mm, variando entre 900 e 2.300 mm

(medidas de 1962 a 1999, pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo – DAEE).

O fato do planalto do André Lopes estar inserido em terras altas difere das outras áreas cársticas do Vale do Ribeira, que correspondem a terrenos mais rebaixados na paisagem, como as áreas Furnas-Santana e Lageado-Bombas (Karmann, 1994) (Figura 3C). No carste do André Lopes a superfície no mármore ocorre entre 330 a 850m, posição mais rebaixada topograficamente em relação às bordas metapelíticas, que apresentam altitudes em torno de 850 a 1.010 m. Este quadro morfológico se deve à natureza mais solúvel das rochas carbonáticas, resultando na formação de uma espécie de anel morfológico mais elevado ao seu redor do mármore (Campanha et al., 1985). Expressivas deposições de tufas ocorrem nas drenagens locais, situação esta que, no Estado de São Paulo, ocorre apenas na faixa carbonática André Lopes, devido a esta situação positiva, que resulta em uma natureza essencialmente autogênica de suas águas (Sallun Filho et al., 2012b).

A história geomorfológica da região do Vale do Ribeira está relacionada com a origem e evolução da Serra do Mar. A origem desta feição morfológica tem início a cerca de 25 milhões de anos após o término do rifteamento continental (134-114 Ma), quando um soerguimento regional de natureza epirogenética da crosta continental foi desencadeado em resposta à passagem da Placa Sul-Americana sobre o *hotspot* de Trindade (Zalan e Oliveira, 2005; Riccomini, 1995). Acredita-se que este soerguimento epirogenético teve seu término no limite Cretáceo-Paleoceno, e gerou um domeamento regional criando um divisor de águas entre o Oceano Atlântico e o continente a oeste (Riccomini et al., 2004; Ab'Sáber, 2006).

De acordo com Zalan e Oliveira (2005):

“Um megaplanalto de cerca de 300.000 km² (Serra do Mar Cretácea) foi formado durante este período e transformou-se na principal área-fonte de sedimentos coniacianos-maastrichtianos das bacias de Santos, Campos e Paraná. À medida que se alçava, seu topo era bizelado e nivelado pela erosão. Ao final de seu soerguimento, exatamente no limite Cretáceo/Terciário, uma superfície de aplainamento (Superfície Japi) nivelou-o em torno de 2.000m em relação ao nível do mar atual.”

Este evento tectônico do Paleoceno teve como resultado o desnivelamento da Superfície Japi por falhamentos, configurando o relevo em blocos tectônicos e gerando

ainda a instalação das depressões tectônicas (semigrabens) do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) (Riccomini, 1995). Este evento foi denominado por Almeida (1967) apud Ross (2002) de Reativação Waldeniana.

A Serra do Mar anterior ao RCSB constituía um planalto contínuo, porém, a partir do entalhamento das redes de drenagem desencadeadas pela instalação do Graben de Sete Barras e Cananéia (Souza et al., 2006) ocasionou a instalação e abertura do Vale do Rio Ribeira e consequentemente a interrupção da Serra do Mar no litoral paulista (Almeida e Carneiro, 1998).

O avanço da erosão da bacia do Ribeira para o interior do continente, expôs as rochas carbonáticas do Grupo Açungui. Karmann (1994) atribuiu com base no estudo da evolução do vale do Rio Betari (Figura 3C) que o entalhamento da superfície no Alto Vale do Ribeira se deu no mínimo a partir do Mioceno Inferior a Médio.

Em relação ao carste apenas poucos trabalhos mencionam feições típicas. Ponçano et al (1981) descreve a área como Morros em Área de sumidouros. Para Campanha et al (1985), o Planalto da Tapagem é apenas a área Tapagem/Frias/Claro, que corresponde ao planalto em si (área mais alta e aplainada), ficando o setor Ostras/Sapatú em unidade de Morros, Morrotes e Montanhas, que é o mais comum na unidade. Desta forma a Serra do André Lopes engloba o Planalto da Tapagem, mas não é considerado planalto como um todo segundo estes autores. Além disso, de acordo o planalto não englobaria os vales da Tapagem e Ostras e a área do Sapatú (segundo os mapas apresentados).

Hiruma et al. (2008) realizou um mapeamento da Faixa André Lopes na escala 1:25.000 com o intuito de caracterizar feições morfológicas de superfície, entre elas depressões fechadas, cones e sumidouros. Apesar da existência este trabalho, ainda com a aplicação de morfometria, optou-se, para esta pesquisa, não utilizar o trabalho de Hiruma como base cartográfica uma vez que era acreditado que o número de feições fosse inferior a estes dados publicados.

Figura 3: Contexto geomorfológico da área de estudo. A- Províncias Morfoesculturais; B- Unidades Morfoesculturais (A e B, baseados em mapa em escala 1:500.000 de Ross e Moroz (1997), e detalhamento do Planalto da Tapagem segundo Campanha et al. (1985), escala 1:50.000); C- Mapa hipsométrico baseado em SRTM.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo basicamente consistiu na caracterização geomorfológica da Serra do André Lopes e geoespeleológica da Gruta da Tapagem, cujos métodos são descritos em detalhe a seguir.

2.1 Geomorfologia cárstica

Para este estudo na morfologia do carste da Serra do André Lopes foi feito um mapeamento aerofotogramétrico e aplicação de análises morfométricas a fim de permitir a investigação de zonas morfológicas no planalto carbonático do André Lopes. O estudo morfológico do relevo e aplicação de técnicas morfométricas foi baseado nos trabalhos de Williams (1971 e 1972), Karmann (1994) e Sallun Filho (2005).

A metodologia simplificada e os dados utilizados para os estudos geomorfológicos encontram-se resumidos na Figura 4.

Figura 4: Fluxograma da metodologia e os dados utilizados para os estudos geomorfológicos.

2.1.1 Organização da base cartográfica

Uma base cartográfica foi elaborada para subsidiar a pesquisa, onde foram utilizadas cartas topográficas em escala 1:10.000 do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC, 1989), porém seu uso foi abandonado, pois verificou-se que as feições cársticas não estavam corretamente mapeadas. Optou-se pelo uso do radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Também se utilizaram imagens

LANDSAT e Rapideye (5m), para apoiar o estudo. As bases foram reunidas em ambiente SIG com a utilização dos *softwares* ArcGis 9.1 e Global Mapper 11.

Como base de dados de geologia, foram utilizados os mapas geológicos de Campanha (2002) em escala 1:250.000 e Faleiros et al. (2012 e 2013) em escala 1:100.000. A base geomorfológica regional adotada foi a de Ross e Moroz (1997) escala 1:500.000.

2.1.2 Fotointerpretação

O mapeamento de áreas cársticas exige um olhar especializado, principalmente no que diz respeito à restituição da rede de drenagem e divisores topográficos. Em áreas florestadas, a presença de cobertura vegetal dificulta ainda mais a análise do intérprete. O mapeamento com fotografias aéreas ainda são consideradas a melhor forma de se elaborar um mapa morfológico de terrenos cársticos, utilizando escalas de detalhe a partir de 1:25.000 e estereoscopia (Ford e Williams, 1989). É importante afirmar que a restituição aerofotogramétrica varia de acordo com o intérprete e a escala de mapeamento.

Para a realização do mapeamento aerofotogramétrico em escala de detalhe 1:25.000, foram restituídas cinco faixas de vôo resultando em um total de 39 fotografias aéreas restituídas, obtidas pela Secretaria de Agricultura do Estado de SP em junho e julho de 1972 e 1973 (Figura 5). As folhas do fotoíndice (SG.22-X-B-V e SG.22-X-B-VI) de escala 1:100.000 foram georreferenciadas e serviram de apoio na localização das fotografias e identificação de localidades da área mapeada (São Paulo, 1973a e b).

O mapeamento foi baseado na restituição da rede de drenagem e delimitação de divisores topográficos, lineamentos estruturais e feições cársticas como sumidouros, ressurgências, dolinas e cones residuais. Para isto utilizou-se estereoscópio de espelho e um interpretoscópio do Laboratório de Microscopia do Instituto Geológico do Estado de São Paulo. Curvas de nível com equidistância de 2m foram geradas a partir de dados SRTM para apoiar na restituição de divisores topográficos das bacias de drenagem.

Um mosaico dos *overlays* das fotografias restituídas foi organizado e georreferenciado a partir dos mapas topográficos do IGc 1:10.000. O georreferenciamento foi guiado especialmente pelo cruzamento dos divisores topográficos, cones cársticos e redes de drenagem principais. Posteriormente o mosaico foi digitalizado e adicionado ao banco de dados SIG e vetorizado.

Figura 5: Articulação das faixas aerofotogramétricas utilizadas para o mapeamento da área cárstica.

2.1.3 Perfis e análise morfométrica

Para melhor compreender os compartimentos, o contexto do planalto com as bacias hidrográficas e a geologia, foram confeccionados perfis topográficos do relevo a partir de base dados SRTM com a utilização do software Global Mapper 11. Os perfis topográficos forneceram informações importantes como comprimento de canais fluviais, relações topográficas entre as unidades de relevo.

A morfometria foi executada a fim de ressaltar as características morfológicas do planalto e apoiar na compartimentação do carste da Serra do André Lopes. Para a obtenção desta representação numérica das formas do relevo, foram levantados os seguintes parâmetros:

- gradiente hidráulico (GH) do rio: dado pela razão entre o desnível topográfico e o comprimento do canal em metros;
- densidade de sumidouros autogênicos (Ds): vai indicar a frequência de pontos de absorção sobre a superfície carbonática, refletindo no grau de segmentação da drenagem superficial (Karmann, 1994);

$D_s = \text{n}^\circ \text{ de pontos de absorção/área de carbonatos (km}^2\text{)}$

- análise da rede de drenagem: a partir da densidade de drenagem e ordenamento dos canais das bacias poligonais (Williams, 1971);
- elipsidade das depressões fechadas: pela medida do eixo maior sobre o eixo menor, indica o grau de circularidade do divisor topográfico da bacia em planta;
- análise das direções dos eixos maiores e menores das depressões poligonais: indica se há padrões podendo relacionar com os controles estruturais;
- densidade de depressões (D_d): indica a frequência depressões por unidade de área, refletindo no grau de segmentação da drenagem superficial (Karmann, 1994);

$D_d = \text{n}^\circ \text{ de depressões/área de carbonatos (km}^2\text{)}$

- área e perímetro das depressões;
- amplitude das depressões: diferença entre a altitude máxima e a altitude mínima;
- declividade média das unidades morfológicas: indica o grau de inclinação das vertentes podendo ser relacionada com o dissecamento do terreno.

2.1.4 Análise do relevo em campo e sobrevôo

As campanhas de campo foram baseadas no levantamento e interpretação de feições cársticas com checagem de pontos pré-estabelecidos a partir das fotografias aéreas. Para esta etapa do trabalho, foram realizadas cinco campanhas de campo com 161 pontos descritos e localizados com GPS (Figura 6). Para a região do Descampado, a mais inacessível do planalto, foi necessária uma expedição de oito dias com o uso de mulas e cavalos para o transporte de equipamentos e da equipe de campo, em um percurso de cerca de duas horas e meia horas até a base de apoio (Figura 7).

Figura 6: Mapa de caminhamientos, puntos de campo e algumas localidades principais. Base: imagem Rapideye (obtida em 2009).

Figura 7: Logística de campo nos trabalhos de campo na região do Descampado. A- Transporte em animais; B- Casa utilizada como base de campo.

A região sudoeste da serra foi a menos percorrida, pois, além da falta de estradas e trilhas, o acesso à única estrada deste setor não foi permitido pela empresa de mineração MINERVALE.

O sobrevôo de helicóptero teve duração de duas horas sobre a área e possibilitou o reconhecimento da região, observação das formas do relevo cárstico, identificação de pontos selecionados durante fotointerpretação e visualização de áreas não visitadas em campo. Os pontos foram checados a partir de uma rota pré-definida, com retornos aos locais de maior interesse. A rota do voo foi demarcada com GPS (Figura 8), e posteriormente a localização das fotografias e suas visadas foram referenciadas pelo horário.

Figura 8: Rota de sobrevôo. O amarelo refere-se à numeração da fotografias e localização da direção de visadas. Base: imagem Rapideye (obtida em 2009).

2.1.5 Zoneamento morfológico

A compartimentação do relevo foi delimitada a partir de critérios morfológicos e hidrológicos. Esta etapa teve início com a interpretação da rede de drenagem, divisores topográficos e feições mapeadas, identificando as unidades morfológicas do relevo existentes no planalto. Em seguida as unidades foram agrupadas em setores, de acordo com as bacias hidrográficas correspondentes. A representação cartográfica das unidades e setores foi realizada a partir de áreas homogêneas.

2.2 Gruta da Tapagem

Os trabalhos na Gruta da Tapagem foram os que demandaram a maior parte do tempo em campo. O estudo incluiu trabalhos de campo para confecção de perfis transversais, perfil longitudinal e obtenção de dados geológicos. Os dados obtidos foram organizados e posteriormente analisados em gabinete.

A metodologia e os dados utilizados no estudo da Gruta da Tapagem encontram-se resumidos na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma da metodologia e os dados utilizados para o estudo da Gruta da Tapagem.

2.2.1 Organização do mapa e base de dados

A planta topográfica da Gruta da Tapagem foi a base cartográfica utilizada nesta etapa do trabalho (SBE, 2008). Os dados topográficos foram obtidos ao longo de

diversas expedições realizadas pelo PROCAD desde 1990 até hoje, e foram gentilmente cedidos pela Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE em arquivo no formato SURVEX. Desta forma, a caverna não foi remapeada, com exceção do trecho de um salão que se encontrava incompleto (denominado neste trabalho de “Salão do Dique”).

O mapeamento do PROCAD foi feito com bases topográficas que constituem pontos de retirada de medidas, posteriormente lançadas em arquivo Survex para gerar uma linha de trena (esqueleto) da caverna. Em algumas bases fixas da linha de trena foram instaladas chapas metálicas ao longo de toda caverna, denominadas de “delta” (Δ). Estes deltas serviram como ponto de referência para a localização dos perfis transversais, desenhos, medidas estruturais e fotografias obtidas ao longo da caverna.

Para inserir a planta topográfica da caverna no ambiente SIG foi obtida uma coordenada com GPS em uma base $\Delta 0$, que foi conectada com a base topográfica inicial da linha de trena. No programa Survex é possível saber o desnível em metros entre a base inicial da topografia e outra qualquer. Sabendo a altitude da base inicial foi possível extrair o valor da cota altimétrica real de cada base, isto a partir da diferença entre o desnível base de interesse/base inicial com a altitude real da base inicial. Assim, foram obtidas as cotas altimétricas dos perfis transversais possibilitando ainda estabelecer uma relação com a superfície, utilizando perfis topográficos de relevo do SRTM.

2.2.2 Trabalhos de campo

Foram necessários dezessete dias de trabalhos de campo na Gruta da Tapagem, incluindo um acampamento subterrâneo de três dias para os trabalhos na área mais central da caverna. É importante ressaltar que a caverna apresenta um alto grau de dificuldade de exploração, como o acesso as galerias superiores onde há necessidade de utilização de técnicas de vertical, e o caminhar pela galeria do rio que apresenta diversos trechos de cachoeiras e natação. Além disso, o clima chuvoso da região faz com que haja grandes riscos de enchentes. Imagens dos trabalhos de campo na caverna podem ser vistas na Figura 10.

Trinta perfis transversais e um perfil longitudinal foram confeccionados, com o auxílio da planta topográfica e sua linha da trena. A medição das reais dimensões de largura das paredes e altura do teto dos condutos e salões foi feita com utilização de trena a laser com alcance de 100m. Os dados obtidos em campo foram corrigidos com

os dados originais da linha de trena e desenhados em software Corel Draw X16. O registro fotográfico dos condutos e feições serviu de auxílio na interpretação e confecção dos perfis.

Um percurso na superfície acima de parte da caverna foi realizado a fim de levantar medidas geológicas do mármore e feições de relevo para correlacionar com a evolução da caverna.

Figura 10: Trabalhos de campo na Gruta da Tapagem. A- Percurso na galeria do rio; B- Elaboração do perfil longitudinal; C- Acampamento subterrâneo e D- Trabalhos com corda na Rede Gava (Foto: Marcos Silvério).

2.2.3 Obtenção de dados geológicos e estruturais

Foram tomadas ao todo 40 medidas de fraturas, acamamento e diques de diabásio reunidas em estereograma. As medidas foram lançadas na planta da caverna, nos perfis transversais e no perfil longitudinal para verificação e compreensão da relação entre o conduto e a rocha encaixante.

Três amostras de mármore e três amostras de diques de diabásio foram coletadas para preparação de lâminas e caracterização das rochas. Foram realizadas duas

análises químicas das rochas carbonáticas classificadas segundo Leighton e Pendexter (1962), convertendo os óxidos em quantidades de dolomita, calcita e impurezas conforme Martinet e Sougy (1961). A coleta de amostras foi previamente autorizada pelo CECAV-ICMBIO (nº 30591-1).

3 GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

A Serra do André Lopes constitui um planalto residual que compõe um divisor topográfico entre o rio Ribeira e dois afluentes importantes da sua margem direita, os rios Pardo e Batatal. O planalto é drenado por bacias cársticas (depressões fechadas) e bacias fluviais de superfície, drenadas por cinco rios principais: os rios Claro, Frias, Arivá, Tapagem e Ostras.

As bacias hidrográficas dos rios Claro e Frias têm o rio Pardo como nível de base fora do planalto e drenam suas águas no sentido sudoeste. Já as bacias dos rios Tapagem/Ostras e Arivá drenam para o sentido noroeste, e tem o rio Ribeira como nível de base. O traçado deste divisor principal foi interpretado e delimitado neste trabalho, podendo ser visto na Figura 11 e no perfil A da Figura 12, porém esta interpretação é sujeita a variações de acordo com a escala de mapeamento.

A partir da extração da rede de drenagem, análise morfológica de feições de relevo mapeadas em escala de detalhe 1:25.000 somado aos dados de campo, foram delimitadas três unidades morfológicas básicas: o Carste Poligonal (CP), o Vale Cego da Tapagem (VCt) e os Vales Fluviais (VF) (Figura 11 e Anexo 1). Para avaliar a distribuição espacial e morfológica destas formas de relevo e sua relação com a rede de drenagem, as unidades foram subdivididas por setores definidos a partir da inferência da conexão com as principais bacias hidrográficas do planalto, ou seja, a partir de um critério hidrológico. Ressalta-se que não foram realizados testes com traçadores para confirmar estas conexões, obtendo-se apenas uma referência topográfica, a partir da fotointerpretação, análise de MDT e checagem de campo em superfície. Desta forma, os setores e unidades foram definidos segundo a Tabela 1 e a Figura 11.

O mármore da Tapagem apresenta 68,26km² de área em planta, sendo que cerca de 46,11% da lente carbonática corresponde à área carstica (31,48km²) e os outros 53,88% (36,78km²) da superfície dos mármore é ocupada por vales dominados por processos fluviais de escoamento superficial (Tabela 2). Do total da área cárstica

88,27% é dominado pela unidade morfológica de carste poligonal (CP) e o restante corresponde à área do vale cego da Tapagem (VCt).

Neste trabalho a área cárstica está sendo considerada como as áreas de carste poligonal, mais o vale cego do rio Tapagem. Assim, não foram incluídas as áreas ocupadas por vales com feições exclusivamente fluviais, mesmo que estejam sobre os mármore, pois se considerou que não há carstificação ou ela é incipiente.

Tabela 1: Subdivisão das unidades morfológicas.

Bacia	Sub-bacia (setor)	Unidade morfológica	Sigla
Ribeira	Arivá	Carste Poligonal	CPa
	Tapagem/Ostras	Carste Poligonal	CPto
		Vale Cego	VCt
		Vale Fluvial	VFo
	Sapatú	Carste Poligonal	CPs
Pardo	Claro	Carste Poligonal	CPc
		Vale Fluvial	VFc
	Frias	Carste Poligonal	CPf
		Vale Fluvial	VFf

Tabela 2: Índices gerais do carste da Serra do André Lopes.

Mármore da Tapagem	Área Total (km ²)		Altitude no calcário (m)		Média
			Máxima	Mínima	
	68,26		840	335	639
Área do carste na SAL*	Área Total		Área de recarga alogênica	Área de recarga Autogênica	Área do carste em relação ao mármore**
	km ²	38,56	7,08	31,48	31,48
	%	100	18	82	46,11
Carste Poligonal – CP	Área Total		Área Alogênica	Área Autogênica	Área de CP x área cárstica
	km ²	34,04	4,92	29,12	88,27
	%	49,86	14	86	
Vales Fluviais Principais – VF (sobre os mármore)	Vale Fluvial do Rio Frias – VFf		Vale Fluvial do Rio Claro – VFc		Área Total
	km ²	16,83	6,09		36,48
	%	45,75	16,57		100
	Vales Fluviais indiferenciados		Vale Fluvial do Rio das Ostras – VFO		Área de vales fluviais em relação ao mármore ***
	km ²	12,23	1,63		53,88
	%	48,69	4,43		78,93

* O carste foi considerado como as áreas de carste poligonal e o vale cego do Rio Tapagem.

** calculado a partir da área autogênica de CP e VCt.

*** calculado a partir da soma das áreas dos VF.

Figura 11: Mapa geomorfológico simplificado, com a localização dos perfis topográficos e identificação das bacias poligonais.

Figura 12: Perfis topográficos da Serra do André Lopes, com indicação dos compartimentos morfológicos e rios principais.

A natureza da recarga hidrológica no carste é essencialmente autogênica, apresenta 82% do sistema alimentado por injeção de água meteórica em depressões poligonais. Já os outros 18% da recarga é de origem alogênica, que drenam a borda metapelítica das unidades de CP e do VCt (Tabela 2). No estudo de sistemas cársticos autogênicos, as depressões poligonais correspondem a uma feição cárstica que, assim como as bacias hidrográficas são consideradas unidades básicas na investigação geomorfológica, o mesmo se dá em relação às depressões poligonais, ou seja, a sua delimitação e caracterização morfológica são elementos fundamentais no entendimento do escoamento superficial e de mecanismos de recarga dos aquíferos (Gunn, 1981 apud Karmann, 1994).

No geral, a morfologia do relevo no carste é de morros convexos e cones residuais, que apresentam maior inclinação na sua vertente norte para NW, acompanhando o mergulho da foliação do mármore (Figura 13B). As cristas são bastante estruturadas e alinhadas de acordo com duas direções predominantes NE e NW. A direção NW orienta principalmente as cristas de divisores secundários. Não existem muitos afloramentos rochosos devido à densa cobertura de Floresta Atlântica e a presença de um manto de solo residual, estando estes afloramentos concentrados em fundo de vales, encostas e topo de cones.

A superfície do mármore atinge cotas mínimas de 335m e máximas de 840m (Tabela 2), posição mais rebaixada em relação às bordas metapelíticas que chegam a 1.010m de altitude. Este rebaixamento da superfície carbonática em relação a suas bordas metapelíticas é bastante acentuado na zona de contato. Nas depressões fechadas das unidades CP ocorre uma concentração da injeção de água nesta zona, já nas unidades de VF ocorrem um encaixe e entalhamento dos canais, como exemplo o rio Claro e Frias (Figura 13B e Figura15B). Além desta característica, há uma heterogenidade topográfica já descrita no item 1.4, onde duas superfícies topográficas predominantes se destacam. A superfície mais rebaixada se concentra na porção nordeste do planalto, tem os fundos de vales entre 420 a 480m e topos de cones cársticos entre 630 a 760m, (setores VCt, VFo e CPs). A segunda tem os fundos de vales e depressões entre 550 a 660m aproximadamente, com topos de cristas e cones entre 765 a 840m, corresponde a toda centro sudeste. O contraste topográfico entre esses dois compartimentos pode ser observado no perfil A da Figura 12.

A partir da escala de detalhe 1:25.000, foram delimitadas 53 depressões fechadas sobre o Mármore da Tapagem.

A partir da relação entre o número de depressões poligonais e a área do mármore, foi obtida uma densidade de depressões (Dd) de 0,78 por unidade de área. Já em relação à área total do carste poligonal obteve-se uma densidade de depressões de 1,56.

Quanto aos pontos de absorção da drenagem superficial, foram identificados 69 sumidouros por todo o planalto, sendo 59 autogênicos e 10 alogênicos. A densidade de sumidouros autogênicos em relação à área de carste poligonal é de 1,73 por km², enquanto que na área cárstica é de 1,53. Já em relação à área total do mármore, obteve-se uma densidade de 0,86 sumidouros/Km².

3.1 Setor Claro – CPc e VFc

O setor Claro está situado no sudoeste da SAL, sua porção norte é ocupada pela unidade carste poligonal do Claro (CPc) e sua porção sul pelo vale fluvial do rio Claro (VFc) (Figura 13A). Essas duas unidades estão individualizadas por cristas carbonáticas alinhadas a NE que compõem o divisor topográfico deste setor.

A área de CPc ocupa 18,48km² e corresponde a maior extensão em área das unidades de carste poligonal. Os limites norte e oeste são marcados pela borda metapelítica, que compõe as vertentes de depressões poligonais responsáveis por proporcionar 14,28% de recarga hidrológica alogênica para esta unidade. A superfície é levemente ondulada com predomínio de morros convexos (declividade média de 17% e 22% para o VFc) e cones cársticos que delimitamos os topos dos interflúvios (Figura 13B). As cotas mínimas e máximas variam de 600 a 804m (Tabela 3), com uma amplitude média de 82m.

Figura 13: Setor Claro. A – MDT do Setor Claro com a indicação das unidades de relevo e das visadas fotográficas de B e C; B- visão oblíqua do VFc com indicação do ponto de saída do rio Claro do Planalto (I); C- visão oblíqua do CPc, (m) metapelitos.

Por toda a área ocorrem dolinas, canais fluviais secos e sumidouros, em alguns pontos, onde há ausência de cobertura vegetal, é possível observar que a superfície é dominada por dolinas de dissolução, porém a escala de observação do mapeamento não permitiu a representação destas feições (Figura 14B).

Os fundos das depressões caracterizam-se como pontos de absorção pontuais instalados no leito de canais fluviais (Figura 14B), resultando em uma rede de canais secos; ou como áreas elípticas planas e colmatadas com preenchimento aluvial, ocasionando ou não acúmulo de água (várzea) (Figura 14C). As depressões poligonais são alongadas em planta, com 2,1 de elipsidade média. Analisando seus eixos maiores são notáveis as direções preferenciais NW e NE, sendo que as mais extensas em área apresentam direção preferencial NW.

Em termos de extensão e desenvolvimento, duas grandes bacias poligonais se destacam neste setor, são elas a d37 e as d30-d35 que atingem 3,36km² e 4,81 km² em área, e 10,71km e 14,75km de perímetro respectivamente; as únicas bacias com canais de drenagem de até quarta ordem (Figura 13A e Tabela 3).

Atribui-se aqui que a água drenada pelas depressões do CPc percolam o maciço carbonático por linhas de fluxo de água subterrânea em direção ao rio Claro (VFc), que por vez, já fora do planalto, desaguará no rio Frias. O canal deste rio segue encaixado no contado litológico da borda sul do planalto, seu vale apresenta cotas mínimas e máximas de 238m na sua foz a 792m nas cabeceiras carbonáticas, com uma amplitude de relevo de 260m. As cabeceiras carbonáticas estão concentradas na margem esquerda, instaladas na vertente sul do divisor que delimita o CPc e o VFc, enquanto que, a sua margem direita é composta pelos metapelitos (Figura 13B).

No mármore o rio Claro possui um gradiente hidráulico baixo, com valor de 0,07 até a sua saída do planalto pela vertente sul, que é marcada por uma quebra brusca do relevo, resultando em uma mudança do valor do gradiente para 0,18. Já fora do planalto, o canal sofre influência da zona de lineamento Lancinha, desenvolvendo outra quebra de relevo (*knickpoint*) em resposta este controle estrutural, alterando o valor do gradiente para 0,15 até a sua foz no rio Frias (Figura 14E).

Uma das evidências que indicam a alimentação do rio Claro por águas bastante carbonatadas, é a presença de depósitos de tufas em seu leito. Segundo Sallun Filho et al. (2012b), este rio possui o depósito de tufas mais antigo e extenso da região, seu topo foi datado em mais de 42.000 anos AP, e a base em 25.390 anos AP, sendo

consideradas idades mínimas (Figura 14 D e F). A ocorrência deste depósito químico foi observada por pelo menos 2km, desde o planalto carbonático até sua foz.

Figura 14: Feições de relevo do Setor Claro. A- Dolinas de dissolução indicadas pela seta vermelha; B- sumidouro instalado em leito de canal fluvial; C- Fundo de depressão plano e colmatado com preenchimento aluvial; D- Tufa; E- Perfil longitudinal do rio Claro com valores de gradiente hidráulico e indicação de D e F; F- Tufa a montante da confluência como rio Frias. (D, E e F modificados de Sallun Filho et al., 2012b e Almeida, 2011).

Tabela 3: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Claro.

Carste Poligonal do Claro – CPC										
Depressão	Perímetro (km)	Área Total (km²)	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Amplitude (m)	Ordem dos canais	Eixo maior (km)	Direção do eixo maior (graus)	Eixo menor (km)	Elipsidade
d15	4,923	1,43	790	650	140	3	1,314	58	1,121	1,17
d20	1,188	0,088	788	720	68	2	0,722	325	0,125	5,78
d21	8,191	2,144	804	634	170	4	2,423	33	1,732	1,40
d22a	1,76	0,128	704	636	68	2	0,596	91	0,212	2,81
d22b	1,374	0,073	702	638	68	1	0,43	285	0,14	3,07
d23a	0,78	0,035	638	600	38	1	0,259	25	0,165	1,57
d23b	0,911	0,043	640	614	26	1	0,302	64	0,168	1,80
d24	0,474	0,015	650	636	14	1	0,138	321	0,106	1,30
d25	5,104	1,344	726	608	118	4	1,649	356	1,313	1,26
d26	1,184	0,076	684	670	14	2	0,405	284	0,209	1,94
d27	6,848	1,43	718	624	94	3	1,958	76	1,495	1,31
d28	3,673	0,445	780	684	96	2	1,145	328	0,644	1,78
d29	6,927	1,443	772	658	114	2	1,989	324	1,085	1,83
d30	7,104	1,946	764	638	126	3	1,978	319	1,832	1,08
d31	2,564	0,352	716	622	94	2	0,785	63	0,639	1,23
d32	6,353	1,08	750	600	150	3	1,706	75	1,017	1,68
d33	0,313	0,079	720	668	52	1	0,533	354	0,174	3,06
d34	0,563	0,017	718	690	28	1	0,201	43	0,117	1,72
d35	10,715	2,87	792	656	136	3	2,361	301	2,32	1,02
d36	1,298	0,082	716	698	18	1	0,408	59	0,168	2,43
d37	11,298	3,361	778	628	150	4	3,22	301	0,826	3,90
d35+d30	14,755	4,816	792	638	154	4	4,16	298	0,996	4,18

3.2 Setor Frias – CPf e VFf

O setor é composto pelas unidades carste poligonal do Frias (CPf) e o vale fluvial do rio Frias (VFf). Estas duas unidades ocupam 46,17% da área do mármore e tem como drenagem principal o rio Frias, que drena para sudoeste e tem o rio Pardo como nível de base já fora do planalto e do carste. Atribui-se aqui que a água drenada pelas bacias poligonais do CPf, percolam o maciço carbonático por linhas de fluxo de água subterrânea em direção ao rio Frias.

A superfície neste setor é a menos dissecada do planalto, na margem direita do Frias o relevo é levemente ondulado com vertentes convexas e declividade média de 17%. A margem esquerda é composta por vertentes mais côncavas com 29% de declividade relativas as borda metapelíticas.

A bacia do rio Frias é a maior bacia hidrográfica sobre o mármore, tem como principal afluente o rio das Pedras (Figura 16D). No planalto o canal possui 7,7km de comprimento e corre no sentido SW, o valor do gradiente hidráulico é 0,026, onde o canal corre sempre encaixado na zona de contato litológico entre os mármores e os metapelitos no flanco SE do sinclinal (Figura 15B). Após sua saída do planalto há uma quebra de relevo que aumenta o gradiente para 0,17 até o canal retomar a direção SW e seguir em rumo ao rio Pardo, com um gradiente de 0,031 (Figura 16G).

O ponto de saída do rio Frias do planalto é marcado por uma inflexão abrupta do canal de quase 90° de SW para SE. Neste ponto de inflexão o fluxo do rio que era de NE- SW no planalto se inverte para NW-SE. Em fotografia aérea e MDT é possível observar uma grande estrutura linear controlando esta inflexão abrupta, aparentando ser um prolongamento de uma estrutura associada ao lineamento do “Dique do Betari”, que condiciona os sistemas cársticos a montante do rio Ribeira (Karmann, 1994).

Feições cársticas isoladas foram observadas em campo na área do VFf, como pequenos vales fluviais em segmentação pela instalação de dolinas de dissolução, afloramentos rochosos e lapiás (Figura 16). Porém essas feições não foram delimitadas devido à limitação na escala do mapeamento.

Figura 15: Setor Frias. A- MDT com indicação das visadas de B e C; B- Vista a SW do setor Frias com indicação do canal drenando a SW, encaixado na zona de contato. O círculo rosa indica o cotovelo do rio Frias na saída do planalto controlado por lineamento; C- Vista a NE do VF.

A recarga hidrológica do rio Frias é mista, ou seja, o rio é alimentado por água de escoamento superficial tanto dos mármores quanto dos metapelitos, e ainda, por águas subterrâneas injetadas no CPf. A recarga de água por rotas subterrâneas é evidenciada pela presença de nascentes cársticas que ressurgem na margem direita do canal, além disso, depósitos ativos de tufas vêm sendo depositadas no leito de afluentes da sua margem direita. Porém, no canal do rio Frias propriamente dito não há ocorrência de tufas, no trabalho de Sallun Filho et al. (2012b) a ausência de tufas em algumas drenagem da SAL podem ser explicadas pela presença de carbono orgânico dissolvido proveniente da decomposição da floresta ou por maior aporte de sedimentos terrígenos em suspensão.

A unidade CPf está inserida na margem direita do rio Frias (Figura 15A), ocupa uma área de 3,8km² com uma recarga hidrológica predominantemente autogênica. As depressões poligonais apresentam uma média da ordem de canais de 1,9, umas com formas mais circulares e outras com formas mais alongadas em planta, atingindo valores de 2,24 de elipsidade média. Seus eixos maiores possuem direções que variam entre NW e NE, como pode ser visto na Tabela 4. As cotas mínimas e máximas variam entre 600 a 800m respectivamente, o que implica em uma amplitude média destas depressões de 90m.

O fundo das depressões poligonais podem se apresentar de três formas: 1- como uma área elíptica deprimida e plana com preenchimento de sedimento, solo residual e divisores que suavizam em direção ao rio Frias; 2- fundo mais afunilado e dissecado com sumidouro; 3- fundo dominados por leitos fluviais secos. O primeiro caso ocorre nas depressões mais alongadas, sugerindo um antigo vale fluvial interrompido pela instalação de pontos de absorção. O segundo caso tem como exemplo uma depressão poligonal localizada nas cabeceiras do Rio das Pedras (principal afluente da margem direita do Frias, onde os pontos de sumidouros (cota 679m) e ressurgência (cota 664m) foram facilmente restituídos em fotografia aérea e checado em campo (Figura 16 A e B). Este sistema Cabeceiras Rio das Pedras foi delimitado é representado pela depressão enumerada como d17 (Figura 11). Já no terceiro caso ocorre na maior depressão do CPf (d38), que em planta apresenta uma geometria muito semelhante a de uma pequena bacia hidrográfica de superfície.

Tabela 4: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Frias.

Depressão	Perímetro (km)	Área Total (km²)	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Amplitude (m)	Ordem dos canais	Eixo maior (km)	Direção do eixo maior (graus)	Eixo menor (km)	Elipsidade
d10	3,532	0,518	662	620	32	2	0,982	303	0,371	2,65
d11	1,946	0,217	662	634	28	1	0,712	36	0,323	2,20
d12	5	0,647	800	606	94	3	1,827	344	0,554	3,30
d14	4,312	0,672	752	620	132	3	1,542	301	0,524	2,94
d16	1,791	0,151	660	596	64	1	0,627	299	0,274	2,29
d17	1,669	0,19	750	662	88	2	0,595	38	0,356	1,67
d18	1,098	0,075	772	708	64	1	0,394	359	0,279	1,41
d19	0,842	0,035	746	698	48	1	0,328	63	0,145	2,26
d38	5,24	1,376	778	624	154	3	1,696	314	1,156	1,47

Figura 16: Feições de relevo no setor Frias. A e B- sumidouro e ressurgência em depressão poligonal nas cabeceiras do rio das Pedras; C- afloramento do mármore com feições de lapíás; D- Rio das Pedras correndo sobre depósito aluvial entalhando o terraço a direita da foto; E- rio Frias no planalto; F- rio Frias fora do planalto; G- perfil longitudinal do rio Frias com indicação de E e F.

3.3 Setor Arivá – CPa

O setor Arivá está inserido nos altos das cabeceiras do rio Arivá que drena a vertente norte do planalto para o rio Ribeira (Anexo 1). Esta é uma área não percorrida durante os trabalhos de campo.

Em área o CPa possui um total de 4,408Km² e apresenta uma recarga hidrológica principalmente autogênica, superfície levemente ondulada com 18% de declividade média. As duas bacias poligonais que compõe este setor possuem 1,3 de elipsidade média e direção de seus eixos maiores a NW (Tabela 5). Apesar do valor da elipsidade refletir uma forma quase circular, o perímetro é bastante irregular.

Estas depressões estão individualizadas entre si por um divisor topográfico suave, de aproximadamente 8m, o que induziu a interpretá-las, também, como uma única depressão poligonal. Analisando desta forma, o eixo maior muda de direção, tendendo para NE, com elipsidade de 1,8.

No rio Arivá, ocorrem significativos depósitos de tufas calcáreas ativas, o que indica que este canal vem recebendo alimentação de águas bastante carbonatadas proveniente destas depressões (Almeida, 2011; Sallun Filho et al., 2012b).

Tabela 5: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Arivá.

Carste Poligonal do Arivá – CPa					
Depressão	Perímetro (km)	Área Total (km ²)	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Amplitude (m)
d13	10,971	3,296	808	600	208
d8	4,749	1,112	770	566	204
d13+d8	11,647	4,408	808	566	242
	Ordem dos canais	Eixo maior (km)	Direção do eixo maior (graus)	Eixo menor (km)	Elipsidade
d13	3	3,166	273	2,214	1,43
d8	3	1,453	308	1,236	1,18
d13+d8	3	3,445	67	1,819	1,89

Figura 17: Setor Arivá. A- MDT do Setor Arivá e B- Depósito ativo de tufas no rio Arivá, na saída do planalto.

3.4 Setor Tapagem/Ostras – VFo, VCt e CPto

O setor Tapagem/Ostras apresenta três unidades morfológicas definidas como Vale Fluvial das Ostras (VFo), Vale Cego da Tapagem (VCt) e Carste Poligonal Tapagem/Ostras (CPto). Estes três compartimentos fazem parte da bacia de drenagem do rio das Ostras, instalado em um vale fluvial de sentido NW que entalha a lente carbonática de forma perpendicular ao seu eixo longitudinal (Figura 18A). Trata-se do vale fluvial mais dissecado da área de estudos, com vertentes convexas que atingem 45% de declividade média. As cabeceiras metapelíticas (Figura 18B), atingem cota máxima de 1.010m de altitude, com o nível de base na cota 56m (rio Ribeira). Na margem esquerda do rio das Ostras ocorre a confluência com rio Tapagem, que

deságua no VFo a partir da ressurgência da Gruta da Tapagem (aspectos sobre a Gruta da Tapagem será detalhado item 4) (Figura 19C).

O rio Tapagem é o principal afluente do rio das Ostras e constitui o rio tronco da unidade VCt. Esta unidade de relevo constitui um vale cego (*blind valley*), uma feição cárstica correspondente a um vale que é fechado repentinamente na sua extremidade inferior, por uma montanha ou uma saliência topográfica, podendo apresentar um fluxo perene ou intermitente absorvido por um ou mais sumidouros (Jennings, 1987) (Figura 19B). A dimensão de um vale cego e a distância em que o rio consegue penetrar no carste está relacionado com o gradiente hidráulico e a concentração de carbonato na água penetrante, ou seja, águas alogênicas (alta capacidade corrosiva) podem gerar grandes vales cegos (Gunn, 1962 apud Jennings, 1987).

A superfície no VCt apresenta vertentes convexas de 34% de declividade média. No alto curso do rio, o canal segue encaixado na zona de contato (sentido NE) onde desenvolve uma planície aluvial com um eixo maior de 375m alongado a NW (Figura 18B), a partir daí o canal flexiona na mesma direção até ser absorvido pelo sumidouro (Figura 18B). As altitudes máximas estão a 980m nas cabeceiras (Figura 18B), e mínimas a 460m no sumidouro, resultando em uma amplitude do relevo de 520m.

A recarga hidrológica no VCt é 61,72% autogênica e 38,27% alogênica, considerando a área do VCt e parte do CPto que drena para bacia do rio Tapagem. Isto significa no maior valor de alimentação de águas corrosivas comparado com os outros setores e unidades do planalto. Segundo dados de Almeida (2011) apesar de, tanto o rio Tapagem quanto o Rio das Ostras, possuírem pH elevado (8,3 e 8,6), o índice de saturação de calcita é mais baixo no Rio Tapagem (0,11) indicando águas menos saturadas e ainda com capacidade de dissolução. Após o ponto da ressurgência da caverna, o Rio das Ostras apresenta índice de saturação de calcita de 0,67, mas sem a formação de tufas.

A unidade CPto está instalada nas cabeceiras da margem esquerda do rio Tapagem e nas cabeceiras da margem direita do rio das Ostras (Figura 18A). Em área o CPto ocupa 1,49km² com 23,9% de recarga alogênica e 76% de recarga autogênica. O total desta recarga alogênica do CPto, pertence as depressões da margem esquerda do rio Tapagem, que têm a segunda maior taxa de contribuição alogênica das unidades de carste poligonal do planalto, seguida do CPs, como pode ser visto na Tabela 11. A elipsidade média é de 2,6 com seus eixos maiores predominando na direção NE.

Figura 18: Setor Tapagem/Ostras. A- MDT com unidades de relevo e indicação da visada fotográfica de B; B- Vista oblíqua do VCt, a seta azul indica o percurso do rio Tapagem, (MT) Mármore da Tapagem e (m) metapelitos.

A água drenada pelas depressões da margem esquerda do rio Tapagem tem como nível de base o córrego Araçá, seu principal afluente. Este córrego possui características de água carbonatada, com o pH elevado (8,64), índice de saturação em calcita com valores positivos (0,77) e alta condutividade (Almeida, 2011), capaz de proporcionar o desenvolvimento do depósito de tufas ativas dentro da área carbonática (Figura 18A).

As depressões poligonais com maior valor em área possuem um fundo amplo e aplainado, no caso da depressão enumerada como as d7c e d7d (Figura 11), há a presença de um canal fluvial ativo, atravessando a depressão e formando o cânion e vale do sistema de cavernas do Rolado, com a saída do rio por uma ressurgência.

Os dois rios principais deste setor apresentam um comportamento ao longo do seu perfil longitudinal que reflete a influência litológica e estrutural das rochas encaixantes. Em perfil é possível observar que o gradiente hidráulico do rio das Ostras varia de 0,48 nas cabeceiras, para 0,07 nos mármore e 0,28 nos filitos a jusante até um quebra de relevo marcado pela zona do lineamento Ribeira, diminuindo novamente para 0,06 até sua foz (Figura 19A). O mesmo ocorre como rio Tapagem, com GH que varia entre 0,3 nas cabeceiras a 0,068 no mármore até o sumidouro (Figura 19B). Além da influência estrutural que condiciona a orientação destes vales e seus canais, existe a erosão diferencial entre os mármore e os metapelitos.

3.4.1 Relação entre as unidades VCt e VFo

Fazendo uma relação entre as unidades VFo e o VCt atribui-se uma possível captura de drenagem por absorção subterrânea do rio Tapagem para o vale do rio das Ostras. Na literatura geomorfológica, uma captura de fluvial corresponde ao desvio das águas de uma bacia hidrográfica para outra, gerando a expansão da drenagem captadora. Uma captura subterrânea ocorre, geralmente, devido à característica mais solúvel da rocha carbonática (Christofolleti, 1977 e Oliveira, 2010).

A presença de um cotovelo no canal do rio Tapagem antes de ser absorvido pelo sumidouro sugere esta captura. Além disso, a partir de imagens SRTM e MDT é possível interpretar que, a jusante do cotovelo citado acima, existe uma continuidade do vale do rio Tapagem até o rio Ribeira (Figura 19A). Esta continuidade do vale é interceptada por um divisor topográfico suave de aproximadamente 16m de amplitude a jusante do sumidouro (Figura 19B e C).

Trata-se aqui de vales quase paralelos que seguiam o mesmo gradiente hidráulico, porém, o rio das Ostras desenvolveu uma vantagem erosiva em relação ao rio Tapagem, talvez pelo fato deste canal estar mais próximo do rio Ribeira e, conseqüentemente, possui um GH maior.

Na medida em que estes rios entalhavam a superfície, o rio Tapagem acabou por interceptar uma rota de fluxo subterrânea pré-existente, que já ampliava em direção ao rio das Ostras, mudando de forma gradual (ou não) o nível de base do Ribeira para o rio das Ostras (Figura 19C). Esta interpretação necessita de uma investigação mais acurada, Oliveira (2010) afirma que saber da existência de um colo não é, necessariamente, uma prova de captura, mas é preciso buscar evidências dos depósitos fluviais existentes.

No momento em que o rio Tapagem é injetado para rota de fluxo subterrânea, o canal flui de forma perpendicular ao escoamento superficial geral (rio Ribeira), ressurgindo posteriormente em superfície na unidade VFo (ressurgência das Ostras). O desnível topográfico entre o ponto de injeção e de ressurgência do rio Tapagem é de 120m (Figura 19B).

Figura 19: Perfis dos rios Ostras e Tapagem. A- Perfil do rio das Ostras com indicação de mudanças no gradiente hidráulico. B – Relação entre o perfil longitudinal dos rios Tapagem e Ostras, com a indicação do sumidouro e da ressurgência do rio Tapagem. Neste caso o perfil do rio Tapagem foi traçado seguindo a continuidade do vale até o rio Ribeira, a fim de destacar o divisor topográfico que foi desenvolvido a partir da instalação do sumidouro; C- Planta esquemática da captura do rio Tapagem.

Tabela 6: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal da Tapagem.

Carste Poligonal Tapagem/Ostras										
Depressão	Perímetro (km)	Área Total (km²)	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Amplitude (m)	Ordem dos canais	Eixo maior (km)	Direção do eixo maior (graus)	Eixo menor (km)	Elipsidade
d5a	2,322	0,276	750	614	136	2	0,829	74	0,488	1,70
d5b	1,312	0,1	750	660	90	1	0,455	20	0,245	1,86
d5c	1,706	0,111	702	658	44	1	0,711	46	0,158	4,50
d5d	0,696	0,028	700	660	40	1	0,293	27	0,133	2,20
d5a	2,322	0,276	750	614	136	2	0,829	74	0,488	1,70
d5b	1,312	0,1	750	660	90	1	0,455	20	0,245	1,86
d5c	1,706	0,111	702	658	44	1	0,711	46	0,158	4,50
d6	3,601	0,724	642	390	252	3?	1,245	349	1,156	1,08
d7b	1	0,047	640	512	128	1	0,35	41	0,108	3,24
d7c	4,082	0,925	844	620	224	3	1,73	55	0,969	1,79
d7d (sistema Rolado)	1,973	0,188	688	622	66	2	0,692	59	0,427	1,62
d7e (Gruta Fria)	0,856	0,034	672	606	66	1	0,362	310	0,141	2,57
d7f	2,207	0,274	688	608	80	3	0,745	54	0,527	1,41

Tabela 7: Índices morfométricos do Vale Cego do rio Tapagem.

VCt							
Área Total (km ²)	Área alogênica	Área autogênica	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Amplitude (m)	Ordem dos canais	Direção do vale principal (graus)
4,521	2,163	2,358	980	460	520	3	318
%	42	58					
Cota Max. (m)	Cota Mín. (m)	Desnível (m)	Comp. do canal(m)	GH no mármore	GH nas cabeceiras alogênicas	GH no mármore até o sumd.	GH total do canal
924	460	464	2.941	0,068	0,3	0,09	0,157 *

*calculado das cabeceiras até o sumidouro.

3.5 Setor Sapatú – CPs

O setor do CPs está localizado no extremo nordeste da lente carbonática, com uma área de 4,54km². O nome “Sapatú” foi atribuído ao setor não em função do rio Sapatú, mas em função da localidade (comunidade quilombola Sapatú). O rio Sapatú, na verdade, drena a vertente sul do planalto para o rio Batatal e interpreta-se que a água drenada pelo CPs alimenta canais da vertente a norte, que drenam para o rio Ribeira. Esta interpretação baseia-se na ocorrência de depósitos expressivos de tufas no córrego Angico (Sallun Filho et al., 2012b). Este setor constitui um sistema cárstico independente, separada dos demais pelo vale do rio das Ostras (VFO).

A recarga hidrológica é 35% de origem alogênica e 64,9% autogênica, representando maior taxa de contribuição alogênica das unidades de carste poligonal. Configura-se como uma ampla depressão alongada a NE, com 2,48 de elipsidade e eixos maior e menor medindo 3,5 e 1,4km respectivamente. Esta depressão configura-se como uma depressão composta, internamente dividida em 10 subdepressões.

As cotas mínimas e máximas atingem de 420 a 668m, com amplitude média de 82m (ver perfil topográfico da Figura 12D), e apresenta uma topografia de vale em “V” com declividade média de 30% e máxima de 69% (Figura 17A). É possível fragmentar o CPs em depressões menores, a partir da presença de pequenos divisores topográficos internos. Ao analisar individualmente as subdepressões do CPs, é observado que as direções dos eixos maiores são NW e possui uma forma mais circular em planta (elipsidade=1,4) comparada a depressão do Sapatú como um todo (tabelas 2 e 9).

No geral a morfologia do fundo é de uma superfície levemente ondulada, com preenchimento aluvial entalhado por canais fluviais secos, que funcionam durante as chuvas. Paredões e afloramentos rochosos são frequentes na base das vertentes com sumidouros associados. Foi observado um sumidouro de drenagem intermitente na depressão d2e, o qual está instalado na base de uma encosta vertical da sua vertente norte. Acreditamos que este seja um sumidouro principal, que agrega toda a água do conjunto de depressões do CPs em épocas mais chuvosas (Figura 17 C).

Uma caverna na base da vertente sul do CPs foi encontrada e registrada como Gruta Sapatú II (SP-728) (Figura 17 D). Apresenta 20m de comprimento com direção N-S, alto controle estrutural e sedimentos no chão e incrustado no teto.

Figura 20: Carste Poligonal do Sapatú. A- MDT com indicação das visadas fotográficas de B e C; B- Visão oblíqua das depressões poligonais do CPs, formando uma grande depressão composta; C- Crista carbonática da vertente norte, ao fundo o rio Ribeira.

Tabela 8: Índices morfométricos do setor Carste Poligonal do Sapatú

Carste Poligonal do Sapatu – CPs										
Depressão	Perímetro (km)	Área Total (km²)	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Amplitude (m)	Ordem dos canais	Eixo maior (km)	Direção do eixo maior (graus)	Eixo menor (km)	Elipsidade
d2a	1,154	1,068	646	590	56	1	0,374	330	0,362	1,03
d2b	0,632	0,022	604	592	12	1	0,285	51	0,123	2,32
d2c	3,257	0,595	640	490	150	2	1,038	5	0,812	1,28
d2d	3,909	0,797	590	448	142	3	1,204	24	0,99	1,22
d2e	5,451	1,501	668	424	244	4	1,806	41	1,289	1,40
d2f	1,231	0,066	528	518	10	1	0,354	354	0,201	1,76
d2g	0,502	0,016	530	508	22	1	0,172	35	0,147	1,17
d2h	0,808	0,033	532	526	6	1	0,272	22	0,239	1,14
d2i	1,136	0,058	566	514	52	1	0,439	33	0,276	1,59
Depressão Maior	9,736	4,542	668	424	244	3	3,491	70	1,405	2,48

4 GRUTA DA TAPAGEM

4.1 Aspectos Históricos

Além de constituir um sistema subterrâneo ímpar da Serra do André Lopes, a Gruta da Tapagem acabou por desempenhar um papel importante no contexto da história da espeleologia paulista e brasileira, foi de forma incontestável a caverna mais famosa do Estado de São Paulo e de todo o vale do Ribeira ao longo do século XX (Bandi, 2007).

Durante a exploração das regiões cársticas do vale do Ribeira, no final do século XIX, o cientista alemão Richard Krone ressaltou a relevância científica da região ao registrar e descrever a localização de diversas cavernas, entre elas, a Gruta da Tapagem (SP-02), que foi a segunda caverna a ser cadastrada no Estado de São Paulo, pela SBE, e uma das primeiras no Brasil (Krone, 1898). A atuação de Krone foi de extrema importância, pois através de suas publicações, despertou o interesse da sociedade sobre a necessidade de preservação das cavernas (Krone 1898, 1904, 1909). A partir daí, em 1901, Lourenço Granato foi escalado pelo governo do Estado para realizar um levantamento de terras onde houvesse grutas calcárias com o objetivo de avaliar as áreas a serem compradas pelo governo, neste contexto, ocorreu a primeira exploração da Gruta da Tapagem e, em 1910, a caverna foi tombada ficando sobre responsabilidade do governo do Estado de São Paulo (Brandi, 2007).

Na década de 60, a caverna passa a ser foco de espeleólogos e exploradores, uma exploração parcial foi realizada pelo CEI (Centro Excursionista de Itatins) e liderada pelo Coronel Petená, o qual incentivou a divulgação da caverna na mídia (Zílio, 2003a e b). Isto teve como efeito uma crescente atividade turística, quando a caverna passa a ser chamada de “Caverna do Diabo” para fins de divulgação na mídia através do Decreto nº 48.818 de 1967 (São Paulo, 1967). Ainda na segunda metade da década de 60, a Sociedade Excursionista e Espeleológica realizou duas expedições aonde foram feitos levantamentos biológicos e meteorológicos (Matos, 1966; Krüger, 1967).

Desde a segunda metade do século XX a Gruta da Tapagem é uma das cavernas turísticas mais visitadas do Brasil, sempre conhecida pela sua beleza cênica e pelo porte dos espeleotemas, constituindo uma *show cave*. Não só desde a sua descoberta como ainda nos dias de hoje é uma das cavernas turísticas mais visitadas no Brasil (Tabela 9), porém apenas no ano de 2010 foi realizado o Plano de Manejo Espeleológico

da Caverna do Diabo, com o intuito adequar o uso turístico da caverna de acordo com as leis ambientais vigentes (Fundação Florestal, 2010). Apoiado no do plano de manejo espeleológico, Lobo et al (2013) apresentou o mapa de fragilidade ambiental da área turística da Caverna do Diabo, com dados multidisciplinares e novas propostas de caminhamento turístico.

Tabela 9: Fluxo de visitantes na Caverna do Diabo (Lobo et al., 2010).

Localidade	Visitantes/Ano				
	2005	2006	2007	2008	2009
Caverna do Diabo (SP)	22.813	27.828	27.545	12.460	24.448

A planta da Gruta da Tapagem vem sendo confeccionada desde a década de 60, desde então três mapas foram publicados ao longo da história do mapeamento (Figura 21). O primeiro mapa foi construído entre 1963 e 1964, quando o espeleólogo Michel Le Bret inicia um trabalho de exploração e mapeamento das grutas do Vale do Ribeira junto à seção de espeleologia do Clube Alpino Paulista. Utilizou as informações de acesso e localidade das cavernas que foram descritas por Krone (Le Bret, 1966) (Figura 21A). Neste trabalho Le Bret fez a primeira tentativa de interpretação sobre a geologia e formação da caverna, ele descreve com detalhamento suas interpretações sobre a evolução da cavidade. A primeira planta representava a galeria do rio e parte do salão ornamentado do sumidouro (que era conhecida como Gruta da Tapagem), os “Salões de Ligação” e a denominada “Gruta das Ostras”. Durante muito tempo a caverna foi separada em duas, e Michel Le Bret foi o primeiro a conseguir realizar a conexão, através da “Galeria de Barro” (Valle, 2001).

No início da década de 90 a Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE, por meio do Projeto Caverna do Diabo - PROCAD, deu início a um novo mapeamento da caverna. Na primeira fase, entre 1990 e 1995, realizou-se o mapeamento de galerias superiores como o Salão Erectus e a Rede Gava, além do detalhamento da área chamada por Le Bret de “Salões de Ligação” (Figueiredo et al., 2007) (Figura 21B). Fora as atividades de topografia e mapeamento, o projeto também era voltado para a avaliação do potencial ecoturístico da caverna e limpeza das galerias. As atividades do PROCAD (segunda fase) retornaram em 1998, foram feitas revisões da topografia e mais expedições exploratórias, cem metros foram adicionados a linha de trena da caverna e a projeção horizontal da gruta chegou a atingir 6.237m (Rodrigues, 2002).

Figura 21: Evolução dos mapas da Gruta da Tapagem. A- Le Bret (1966); B- SBE (1993); C- SBE (2008), utilizado neste estudo.

A terceira fase do projeto teve início em junho de 2006, segundo Figueiredo et al. (2007) o objetivo era reforçar a prospecção externa na Serra do André Lopes e dar apoio ao manejo do Núcleo Caverna do Diabo na busca de roteiros espeleológicos alternativos. As atividades topográficas ainda eram o foco nessa terceira fase. Na última versão do mapa da Gruta da Tapagem (SBE, 2008), foram somados ao mapa o Salão Deditos e Pérolas, o Conduto do “Y”, o Salão Philippe e parte do trecho do rio que é conectado com o Sifão do Cap.

4.2 Aspectos fisiográficos da área de recarga

A área da bacia de drenagem que alimenta o sistema da Gruta da Tapagem apresenta 61,72% de natureza autogênica e 38,27% alogênica. Esta área de captação engloba as depressões poligonais que estão instaladas na margem esquerda do rio Tapagem (parte da unidade CPto, Figura 11 e Anexo 1) mais a unidade VCt. Todo o escoamento superficial é absorvido pelo sumidouro do rio Tapagem, com exceção da área sobre a caverna que, ou infiltra diretamente sobre a caverna, ou escoar para o rio Ribeira nas drenagens superficiais. Os aspectos geomorfológicos investigados e considerações mais detalhadas a respeito da bacia do rio Tapagem foram descritos no Item 3.4.

A Gruta da Tapagem é sistema fluvial subterrâneo ativo, onde observa-se fluxos de inundações catastróficas esporádicas, com transporte de sedimentos terrígenos alogênicos e matéria orgânica (troncos de árvores são comuns), deixando marca de água nas paredes, além de registros verbais históricos de inundações.

As cabeceiras do rio Tapagem encontram-se a cerca de 1.000m de altitude em rochas siliciclásticas e o rio drena até o sumidouro com GH médio de 0,15 (de 0,068 a 0,3), o que favorece a erosão e transporte de sedimentos alóctones para caverna.

Ao longo da caverna há um predomínio de sedimentos grossos, de seixos a matacões de mármore, filito, quartzito, quartzo e diabásio. Mármore e diabásio podem ser provenientes de fora ou de dentro da caverna. Também é comum a presença de clastos de espeleotemas, oriundos de colapso de galerias superiores, e por vezes transportados ou erodidos pelo rio. Ocorrem também sedimentos argilosos e arenosos, porém em menores quantidades que sedimentos mais grossos.

Eventos de inundação promovem erosão por abrasão, que intensificam o fluxo turbulento associado ao predomínio de sedimentos grossos no leito do rio subterrâneo.

Neste caso, erosão mecânica pode ocorrer em maior proporção em relação à corrosão por processos de dissolução, originando feições do tipo marmita (*potholes*) que se desenvolvem em trechos de leito rochoso (Palmer, 2009).

4.3 Arcabouço geológico e estrutural

O Mármore da Tapagem constitui uma estrutura sinformal (Figura 2), e a Gruta da Tapagem encontra-se no flanco NW desta estrutura. De acordo com os mapeamentos realizados (Silva et al., 1981; Faleiros et al., 2013) o flanco NW da sinforma é em parte um flanco invertido. Localmente apresenta dobras secundárias.

O mármore observado na caverna possui bandamento composicional que inclui uma foliação S1 reliquiar da estrutura primária dobrada (S0). Ocorrem dobras intrafoliais, isoclinais e recumbentes (Figura 22A). Em lâmina observa-se textura granoblástica e granulação fina, orientadas segundo a S1 (Figura 22B). A partir de análise química classificou-se os mármore das amostras coletadas como dolomito e dolomito calcítico (dolomita: 98.44 e 90.16%, calcita: 0.00 e 12.25%, impurezas: 1.85 a 0.00%).

A observação e medida de dados estruturais dentro da caverna é extremamente difícil, assim, foram encontrados poucos locais possíveis de observar as estruturas. Os dados medidos em campo foram atitudes dos planos de foliação, fraturas e diques. Foi obtida uma direção da foliação do mármore entre N40-90E, a atitude do mergulho é no geral bastante verticalizada com valores entre 65° e 90°. O estereograma gerado com as medidas apresenta dois grupos de pólos orientados para NW ora SE (Figura 22), evidenciando uma estrutura antiformal (Figura 25), secundária a sinformal regional.

Um modelo geométrico de iniciação de abertura de conduto através da foliação (bandamento) da rocha / clivagem de fratura está representado na Figura 22C.

Figura 22: Mármore na Gruta da Tapagem. A- Dobra intrafolial do bandamento composicional em bloco no leito do rio; B- Fotomicrografia do mármore dolomítico com textura granoblástica e granulação fina, com polarizadores descruzados; C- Protoconduto na galeria do rio condicionado pelo plano do bandamento do mármore; D- Detalhe da Figura 21C, mostrando o aspecto do bandamento e granulação grossa (cristais milimétricos) do mármore.

Ao longo da galeria do rio foram encontrados quatro diques de diabásio identificados como Dique 1 a 4 (Tabela 1 e Figura 24). Estes diques estão posicionados de forma quase perpendicular à orientação geral dos condutos e atingem uma espessura máxima de 3m de largura. Em geral os salões de abatimento são formados nos locais onde ocorrem diques (Anexo 2). Possivelmente durante a espeleogênese podem ter servido como barreiras possibilitando o alargamento do salão, porém os diques foram rompidos, e posteriormente, influenciou na instabilidade da rocha encaixante causando o abatimento de blocos.

Tabela 10: Características dos diques de diabásio encontrados na Gruta da Tapagem.

Dique	Direção	Mergulho	Espessura (m)
1	S140E	85°	0,8
2	S140E	72°	3,0
3	S135E	65°	0,45
4	S115E	80°	0,4

Figura 23: Diques de diabásio encontrados na Gruta da Tapagem. I- Dique 1; II- Dique 2 (escala humana marcada com seta); III- Dique 3; IV- Dique 4.

Figura 24: Estereograma com os pólos das medidas estruturas da Gruta da Tapagem (bandamento, diques e fraturas).

Quanto ao controle estrutural, foi observado que a caverna tem uma morfologia em planta controlada em maior parte pelo bandamento composicional e clivagem ardosiária plano-axial (Proterozóico-Cambriano) de direção geral NE-SW, e de forma mais pontual, pelas fraturas NW. Os diques encontrados não possuem grande influência na morfologia da caverna, possivelmente serviram como uma barreira durante a iniciação mais logo foram rompidos. Esse controle estrutural em planta é bastante expressivo em alguns locais por onde percorre o fluxo da água atual, no setor C o rio flui seguindo direções SW-NE e NE-SW, ora condicionada pela foliação e ora por fraturas de mesma direção dos diques. Em perfil transversal os condutos nos setores A, B e D tem influência do bandamento metamórfico do Mármore da Tapagem, já no setor C o gradiente do Rio Ribeira para NW condiciona a evolução do alargamento vadoso de condutos, e em algumas situações flui contra o sentido do gradiente hidráulico local, rompendo assim, qualquer condicionamento das estruturas da rocha (Figura 9 - perfis 3 e 8). Analisando a morfologia em planta, é possível afirmar que não houve condicionamento dos diques na evolução da caverna, porém alguns condutos se desenvolveram seguindo plano de fraturas associadas.

Figura 25: Planta simplificada da Gruta da Tapagem, com as estruturas observadas.

A Gruta da Tapagem percorre sob a vertente norte de uma crista alinhada a NE-SW, que é interrompida logo na zona de contato. A superfície é marcada por dois cones cársticos nas suas extremidades, entre estes cones há uma área mais rebaixada onde estão instaladas cabeceiras que drenam no sentido do gradiente hidráulico do rio Ribeira, perpendicular ao escoamento subterrâneo do rio Tapagem (Figura 18B, 26 e 27). Esta área deprimida, formando cabeceiras de vales, corresponde ao local de ocorrência de três dos quatro diques identificados na gruta.

O pacote rochoso existente entre o conduto e a superfície apresenta espessuras mínimas de 32m, no Salão Erectus, e 34m no Salão do Dique (Anexo 3 - perfis 6 e 17), espessura máxima é de 240m no Salão dos Macarrões (Anexo 3 - perfil 28), sendo a média obtida para o pacote de rocha sobre a caverna de 104m.

Figura 26: Perfis topográficos longitudinal (A) e transversal (B) da bacia e da Gruta da Tapagem.

Figura 27: Vista do vale do rio Tapagem com indicação do sumidouro e dos morros e cristas sobre a Gruta da Tapagem (vista de SW a NE).

4.4 Morfologia

A caverna se inicia em um sumidouro instalado na base de um cânion, formado pelo recuo da parede externa do próprio sumidouro (Figuras 27 e 28) (Anexo 3, perfil 1).

A caverna possui uma orientação geral a SW-NE (Figura 29) com um desenvolvimento horizontal de aproximadamente 6,23 km (SBE, 2008) e desnível topográfico de aproximadamente 120m, medidos do sumidouro até a ressurgência. Em planta, sua morfologia é predominantemente uma galeria de rio meandrante ativa, que se desenvolve com uma sinuosidade ϵ de 1,3. Apresenta algumas corredeiras e trechos de menor inclinação, com gradiente hidráulico geral ϵ de 0,04. Em perfil transversal, o conduto principal se configura em sua maior parte como um cânion subterrâneo que por vezes é interrompido por grandes salões de abatimentos.

Na porção central da caverna (entre as bases $\Delta 9$ e $\Delta 10$), há uma inflexão de 90 graus, ou seja, a caverna que seguia no rumo NE passa a seguir para SE, justamente onde os mergulhos mudam de direção de caimento de NW para SE. A galeria do rio neste setor é perpendicular ao acamamento. Nitidamente neste ponto de inflexão há alguma estrutura rúptil condicionante, como uma fratura ou falha, podendo ser relacionada aos diques e estruturas associadas. Porém, a estrutura em si não foi observada.

De acordo com características morfológicas, tanto em planta e como em seções transversais, foi possível identificar setores da caverna com morfologia distinta (Figura 29) que serão descritos e discutidos adiante.

Figura 28: Sumidouro da Tapagem (setor turístico) (Perfil 1-Anexo 3).

Figura 29: Planta da caverna e compartimentos morfológicos.

4.4.1 Setor Turístico, Salão Erectus e Rede Gava (A)

Este trecho corresponde ao segmento inicial da caverna, um setor fóssil composto por um amplo salão que tem início no sumidouro do rio Tapagem e duas galerias conhecidas como Rede Gava e Salão Erectus, dispostas de forma paralela em níveis superiores.

O Setor Turístico é composto por um amplo salão onde foi instalado o caminamento turístico de aproximadamente 300m de percurso ao longo de uma passarela de concreto. A riqueza, porte e beleza dos espeleotemas merecem grande destaque, toda a ornamentação deste salão é que faz da Gruta da Tapagem a caverna turística de maior beleza cênica do Estado de São Paulo. Existe uma notável abundância de espeleotemas, entre colunas e cortinas que chegam a atingir mais de 20m de comprimento, todos depositados sobre uma imensa pilha de blocos de rocha abatidos (Figura 30A e B). Grandes espeleotemas estão tombados, seja por solapamento do piso ou desmoronamento, e servem de base para o crescimento de escorrimentos, estalagmites e colunas mais recentes, também de grande porte (Figura 31C).

No salão turístico existe um grande depósito de sedimento colúvio-eluvial com blocos de rocha associados denominado de “Bolo de Noiva”, ocupa todo o piso da parte superior do salão (Figura 31). O sedimento foi injetado por invasão vadosa proveniente de uma depressão ou dolina de abatimento acima da caverna. O ponto de injeção no teto do salão está atualmente obstruído por blocos e sedimento (Anexo 2 – perfil 8). Em superfície não foi encontrado indícios ou vestígios geomorfológicos que possam indicar o local de onde esse material foi carregado, provavelmente sua origem é muito antiga, uma vez que espeleotemas do tipo vela de até 18m de altura foram depositados sobre o sedimento. Assim, a denudação do relevo alterou o contexto original deste evento. Atualmente invasões vadosas ocorrem em períodos mais chuvosos, no início do trecho turístico existe uma abertura no teto da caverna que, em períodos de chuva, drena água através de um conduto vertical.

A morfologia do Setor Turístico é de paredes são lisas e inclinadas segundo a foliação do mármore, blocos de rocha com tamanhos e dimensões variadas estão acumulados por processos de abatimentos (Anexo 2, perfis 5 e 8). O padrão morfológico de conduto alterado se repete ao longo da galeria do rio, quando o entalhamento lateral é intenso pode causar a instabilização da rocha induzindo os abatimentos, assim como

Figura 30: Setor Turístico. A- Início da subida do primeiro salão da caverna no Setor Turístico. Nota-se a grande quantidade de blocos e espeleotemas abatidos. Próximo ao perfil 5. B- Grande coluna inclinada (deslocada) por erosão do piso no Setor Turístico; C- Grande coluna no Setor Turístico.

ocorre em outras cavernas com significativo entalhamento vadoso no vale do Ribeira (Karmann, 1994).

Figura 31: Grande depósito de sedimento colúvio-eluvial provenientes de abertura no teto da caverna. A seta amarela indica um espeleotema do tipo “vela” de quase 18m de altura depositado sobre o “Bolo de Noiva”. Setor Turístico (perfil 8).

O Salão Erectus está posicionado em um nível superior, cerca de 50m acima do rio atual e de forma paralela ao Setor Turístico em planta (Anexo 2, perfis 6 e 7). Constitui um salão bastante ornamentado de estalactites e estalagmites entre outros tipos de espeleotemas (Figura 32A). A disposição do conduto sugere ser o paleosumidouro do rio Tapagem, ou um paleoafluente, uma vez que foram encontrados depósitos fluviais com material alóctone associado (Figura 32B). A morfologia do conduto, em parte, segue o caimento da foliação do mármore ou apresenta uma forma elíptica em seção transversal, porém com pouca visibilidade da parede original por estar preenchido de espeleotemas.

A Rede Gava corresponde a um patamar superior do cânion do rio atual, que fica parcialmente isolada deste, através de espeleotemas. O desnível da Rede Gava e o nível da água atual chega a atingir 70m de altura (Anexo 2 – perfil 10). As seções transversais são alongadas, pois seguem a estrutura verticalizada do bandamento da rocha. Testemunhos isolados de depósitos fluviais argilo-arenosos podem ser observados em diferentes níveis do cânion. Não ocorrem feições de iniciação da espeleogênese na Rede Gava, pois a maior parte deste setor teve o teto revestido por

espeleotemas ou foi alterado por descolamento de blocos. Feições tipo *scallops* podem ser observadas no teto em alguns pontos da Rede Gava, são resultado da erosão causada por sedimentos suspensos e cuja orientação indica o sentido do fluxo da água (Goodchild and Ford, 1971)(Figura 32C).

Figura 32: Salão Erectus e Rede Gava. A- Setor do Salão Erectus rico em estalagmites e estalactites (perfil 6); B- Depósito fluvial no Salão Erectus, material grosseiro com seixos alóctones e autóctones e matriz argilo-arenosa; C- Trecho da Rede Gava que conecta com a Galeria do Rio. No teto feições de *scallops* na base da foto sedimento fluvial (perfil 10).

4.4.2 Galeria do Rio (B)

A galeria do rio tem início logo após o sumidouro da caverna, apresenta dois pontos de represamento do canal no início do trajeto subterrâneo, depois o rio segue encaixado na lateral do Setor Turístico e Rede Gava (Figura 33A). Em planta, a galeria do rio corresponde a um conduto estreito, alongado (2,84 km de extensão) e sinuoso (1,3 de sinuosidade), com a abertura pontual de alguns salões. Possui duas direções preferenciais distintas: primeiro o conduto se desenvolve a SW-NE seguindo estruturas planares da foliação do mármore e, em determinados pontos, sofre flexão para SE onde o desenvolvimento é condicionado por fraturas NW-SE (Figura 25). A partir da confecção e análise de seções transversais foi possível afirmar que a galeria do rio é representada, em sua maior parte, pela forma de cânion subterrâneo, em alguns trechos os condutos são mais circulares e, por vezes, salões côncavos de teto arqueado com chão de blocos abatidos.

A geometria do cânion subterrâneo apresenta no geral paredes retilíneas, verticalizadas ou inclinadas com o sentido do caimento alternando segundo a atitude da estrutura do mármore (Figura 33B e C), em alguns casos não obedece nenhuma estrutura. A dimensão de largura varia de 2 a 15m, inversamente proporcional à altura do conduto, que varia entre 20 a 70m ao longo da caverna (Anexo 2, perfis 3,4 e 5). O conduto do rio possui um leito rochoso ou de depósitos fluviais (areias, cascalhos autóctones e alóctones, ou blocos de rocha e espeleotemas abatidos). Feições do tipo *pendant* podem ser observadas na parede em diversos pontos da galeria do rio (Anexo 2, perfis 10 e 15), muitos deles apresentam cascalho e sedimento incrustados registrando que houve uma fase de agradação seguido do retrabalhamento pela drenagem subterrânea (Palmer, 2007).

No trecho mediano da caverna a galeria do rio muda de direção para SE, a passagem passa a se configurar, em perfil transversal, com uma forma circular e alongada. Estas seções se repetem a jusante entre as cotas 390 a 400m (Anexo 2, perfis 21 e 22), correspondem a condutos de transição, com abertura abaixo da zona saturada e atualmente sofrendo ampliação na zona vadosa. Em setores onde a galeria foi parcialmente preenchida por espeleotemas ou o teto encontra-se inacessível, é difícil a visualização e interpretação da sua morfologia original. A pouco mais de 200m da saída da caverna o canal insurgi em um sifão percorrendo aproximadamente 60m sob a zona saturada, até ressurgir entre blocos no vale do rio das Ostras.

Figura 33: Morfologia da Galeria do Rio. A- Galeria do rio próximo à entrada da caverna (Setor Turístico). Do lado esquerdo da foto a seta amarela indica marca de nível da água (perfis 2, 3 e 4, entre as bases $\Delta 1$ e $\Delta 2$). B- Cânion na galeria do rio, com bandamento do mármore verticalizado (perfil 12, entre as bases $\Delta 4$ e $\Delta 5$); C- Base do cânion com a Rede Gava na porção superior (próximo ao perfil 10 e bases $\Delta 4$).

O acesso à superfície se dá pela ressurgência fóssil (cota 347m), a ressurgência atual foi relocada para cotas inferiores (cota 340m) (Anexo 3, perfil longitudinal).

Existem alguns elementos que registram do entalhamento fluvial ao longo da caverna, porém são escassos. Ocorrem depósitos sedimentares fluviais mais elevados no início do conduto e na porção central, marquises e espeleotemas isolados por processos de solapamento são mais comuns. Alguns desses depósitos soterraram espeleotemas já existentes, evidenciando episódios de aggradação e erosão do preenchimento do conduto. O registro mais recente está a menos de 10m acima do rio, marcado por marquises de espeleotema e sedimento na parede (Figura 33A).

Figura 34: A- Cãnion na galeria do rio com inclinação conforme o bandamento do mármore, próximo (perfil 29, próximo a base $\Delta 24$); B- Depósito de terraço fluvial em nível superior, entre 30 a 40m acima do nível da água atual (fim do Setor Turístico); C- Espeleotema tombado na galeria do rio por erosão e solapamento da base (próximo ao $\Delta 10$).

4.4.3 Salões de abatimento (C)

Com cerca de 1km de extensão, este é o único setor da caverna caracterizado pela ocorrência de uma rede de galerias, algumas posicionadas em níveis distintos. Estas galerias estão orientadas a NE-SW/SE-NW e apresentam grandes salões que se abrem por abatimento.

O aspecto morfológico predominante dos grandes salões é o de colapso das galerias, como no Salão dos Gigantes Caídos (Figura 35A), no Salão Branco e Filipe (Anexo 2, perfis 26 e 27). Os salões possuem tetos irregulares e chão preenchido por grandes blocos abatidos que obliteram o leito do rio dificultando sua progressão, induzindo-o a penetrar entre blocos e em sifonamentos. Neste setor (C), o rio abandona a galeria principal (B) para rota em cotas inferiores, que em determinados pontos, percorre na zona saturada. A morfologia em seção transversal é substituída por passagens triangulares de menores dimensões em relação ao cânion subterrâneo (Anexo 2, perfis 23 e 26), que apresentam pendants na parede e teto (Figura 35D).

A galeria do Salão Filipe é o nível acima do rio atual, está na cota 375m, se conecta com a galeria do rio (B) pela Galeria de Barro a jusante. A galeria Xou da Xuxa (SW-NE) e Avenida dos Macarrões (SE-NW) ainda possuem morfologia original preservada, a primeira corresponde a um conduto de entalhamento e o segundo apresenta formas freáticas, ambos formam o segundo nível acima do rio atual, entre 385 a 395m. A Morfologia de conduto freático não é frequente por toda a caverna, a galeria Avenida dos Macarrões foi interpretada como iniciação freática condicionada por fratura e alargamento vadoso condicionado pelo acamamento (Anexo 2, perfil 28).

A galeria central se prolonga desde o Salão dos Gigantes Caídos, Salão Branco que se conecta com Salão Preto pelo Alto do “T”. Este é o nível mais elevado no setor C, a 400m de altitude em sua base.

Apesar do colapso, é possível reconhecer um padrão labiríntico neste setor, bastante distinto do restante da caverna.

Ao final da galeria do rio, setor A, após a inflexão rio entre as bases $\Delta 9$ e $\Delta 10$, e entre as bases $\Delta 11$ e $\Delta 12$, o rio assume uma característica bastante estruturada. Neste ponto a galeria que segue o rumo SE, tem novas inflexões com rumo NE, depois SSE, NNE, NE, NW, após isso segue meandrante rumo NE. As inflexões de NE para SE e de SSE para NE foram denominadas de Diáclase (possivelmente por Michel Le Bret e sua equipe) em referência a este alto controle estrutural.

Figura 35: Setor C. A- Vista do Salão dos Gigantes Caídos a partir do Salão Michel (perfil 26, entre as bases $\Delta 14$ e $\Delta 15$); B- Perfil de conduto alterado, Salão Philippe; C- leito abandonado do rio sob abatimento de blocos próximo ao salão Gigantes Caídos; D- Passagem triangular da galeria do rio no Setor C (perfil 26).

Por todo o Setor C há uma alternância no condicionamento do bandamento e das fraturas. Imagina-se que neste setor existe uma alta densidade de fraturas, visto a alto controle dos condutos e salões, e abundância de colapsos.

5 DISCUSSÃO

5.1 Compartimentação e evolução do relevo cárstico

A Serra do André Lopes, no ponto de vista hidrológico, se configura como uma lente carbonática onde estão instalados sistemas cársticos distintos. A restituição da rede de drenagem e a delimitação das feições cársticas permitiram interpretar o direcionamento do escoamento superficial, e assim fazer a conexão das unidades de carste poligonal com os vales fluviais correspondentes (Figura 36). De fato existem limitações nesta interpretação, relacionadas principalmente com a escala de mapeamento e com a conexão real destes sistemas. Esta interpretação é conceitual e servirá de base para trabalhos futuros com aplicação de teste com traçadores para sua comprovação.

Figura 36: Esquema conceitual do escoamento superficial e da direção das linhas de fluxo subterrânea dos sistemas cársticos da Serra do André Lopes.

Além da presença de um mosaico de carste poligonal compartimentado em unidades distintas, os processos fluviais típicos com escoamento superficial e depósitos aluviais são bastante atuantes no planalto carbonático (VF). Os vales fluviais ocupam uma área de 36,78 km², ou seja, são 53,88% da área do mármore, sendo que as três bacias principais (VFc, VFf e VFo) correspondem a 82,75% de todos os vales fluviais. O valor restante é representado por cabeceiras de drenagem no mármore que drena diretamente para fora do planalto.

No planalto, as três unidades VF constituem o nível de base para a captação da drenagem subterrânea, que tem a drenagem centrípeta do carste poligonal como principal fonte de injeção de água para o maciço carbonático. Como resultado, o carste poligonal se configura como um mosaico de polígonos em planta (como pode ser visto na Figura 36), que representam divisores topográficos de depressões de dissolução, típicas de carste desenvolvido em climas tropicais e subtropicais úmidos (Williams, 1972b). Nas tabelas 11 e 12 é possível observar que a densidade de depressões (Dd) das unidades CP, com exceção do CPs, é diretamente proporcional ao valor do gradiente hidráulico dos vales fluviais correspondentes. Segundo Day (1976) a densidade de depressões indica o grau de desenvolvimento e intensidade do relevo cárstico. Assim, o CPto apresenta maior Dd e está associado ao VFo, que tem o maior valor de gradiente hidráulico no planalto, já o CPf tem o menor valor de Dd e está associado ao VFf com o menor gradiente.

A recarga de todo o maciço carbonático pode ser considerada essencialmente autogênica, pois apresenta 86% da área drenada sobre o próprio mármore, ainda que algumas depressões poligonais possuam parte de sua área sobre as bordas metapelíticas. Estas águas de origem autogênica tendem a ser mais carbonatadas, o que resulta em uma baixa capacidade de dissolução devido a saturação em CaCO₃ (Ford e Williams, 2007). Williams (1983) afirma que a presença de cobertura vegetal e a decomposição de matéria orgânica servem de fonte adicional de CO₂ para a água de infiltração, o que contribui no processo de dissolução e ampliação de rotas de infiltração da água da chuva. Assim, a presença da floresta Atlântica somada ao solo residual, atualmente exposto ao clima úmido, pode favorecer o desenvolvimento das depressões fechadas.

O mosaico de depressões e a ocorrência de dolinas de dissolução indicam uma funcionalidade de linhas de transmissão subcutânea no carste (epicarste). Quando as linhas de transmissão do epicarste tornam-se rotas preferências da recarga autogênica,

ocorre o rebaixamento do relevo, e condutos verticais podem ser expostos a superfície configuram-se como paleo rotas de infiltração vertical do epicarste (Williams, 2008). No CPf foram encontrados dois condutos com estas características, porém não foram encontrados sistemas de cavernas por todo o setor Claro, Frias, Arivá e Sapatú. As rotas subterrâneas atuais dos setores citados não são acessíveis.

Uma característica marcante de algumas depressões fechadas é a grande proporção em área e um perímetro bastante irregular. A alta irregularidade do perímetro também ocorre nas áreas cársticas Lageado-Bombas e Furnas-Santana que, segundo Karmann (1994), indica uma maior diversidade de estruturas planares propícias a dissolução. A elipsidade média das unidades sugerem que as depressões não possuem formas muito circulares, com exceção do CPc e CPs (como o Sapatu é uma depressão composta, o valor na Tabela 12 equivale a média das subdepressões que a compõem).

Analisando os eixos maiores das 53 depressões fechadas, foi possível identificar dois grupos com direções principais tanto para NW quanto para NE, mas predominando a direção NE (Figura 37). A partir do mapa morfológico, observa-se que as depressões com maior valor em área tendem a ter seus eixos maiores a NW, dando a impressão, à primeira vista, de ser essa a direção predominante. Porém as depressões menores têm o seu eixo maior predominante para NE. Este padrão de orientação dos eixos longitudinais das depressões reflete a influência da estruturação geológica regional na instalação e evolução do carste poligonal.

Figura 37: Rosácea das direções dos eixos maiores das bacias poligonais.

Tabela 11: Índices dos setores da unidade de Carste Poligonal.

Zonas de Carste Poligonal - CP	Área Total	Área Alogênica	Área Autogênica	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Amplitude média (m)	Média da ordem dos canais	Elipsidade média	Densidade de depressões sobre a área de CP
CPC– Claro	km ² 18,48	2,64 14,3	15,84 85,7	804	600	76	2,2	2,05	1,14
CPf– Frias	km ² 3,88	0 0	3,88 100	800	600	90	1,9	2,24	2,32
CPa– Arivá	km ² 4,408	0,034 0,8	4,347 99,2	808	566	206	3	1,3	0,5
CPTo – Tapagem/Ostras	km ² 1,49	0,65 23,93	0,9 76,07	844	390	103	2,6	2,15	4,03
CPs – Sapatú	km ² 4,54	1,59 35,1	2,95 64,9	668	420	82	1,8	1,43	2,2

Tabela 12: Índices dos vales fluviais.

Vales Fluviais	Cota máxima (m)	Cota mínima (m)*	Desnível (m)	Comprimento do canal (m)	GH no mármore	GH nas cabeceiras alogênicas	GH a jusante do mármore	GH total do canal
VFc	792	554	238	2.293	0,07	-----	0,12	0,08
VFf	800	540	260	7.740 **	0,033	0,165	0,07	0,05
VFo	987	205	782	3.323	0,095	0,5	0,23	0,084

* A cota mínima dos vales fluviais é representada pelo ponto de confluência do canal com outros afluentes após sua saída do planalto.

** Comprimento do canal medido apenas no mármore.

No mapeamento realizado por Hiruma et al. (2008), utilizado-se a mesma escala 1:25.000, foram delimitadas 140 depressões fechadas, número bastante inferior em relação as bacias poligonais apresentadas nesta pesquisa (53), mesmo considerando que Hiruma et al. (2008) mapeou também pequenos corpos carbonáticos associados a Faixa André Lopes que não foram incluídos neste trabalho. Os dados aqui apresentados são mais precisos devido ao maior detalhamento em campo.

Na comparação da textura do carste poligonal de outras áreas do vale do Ribeira, na mesma escala de mapeamento, é possível afirmar que estas áreas apresentam uma textura variada pelo menos em dois padrões distintos (Figura 38). As depressões fechadas da região da SAL atingem uma área média de 0,64 Km², cerca de nove vezes maior em relação a área Lageado-Bombas. Na Tabela 13, observa-se que a área média e o perímetro médio das depressões da SAL são mais semelhantes a área cárstica de Itaiacoca (Bom Sucesso).

A geometria da superfície cárstica é um reflexo do balanço entre a taxa de recarga e o regime de infiltração, controlada pela condutividade vertical da rocha carbonática (Williams, 2004). Como as áreas estão expostas as mesmas condições climáticas regionais (pretéritas e atuais), a diferença na textura da superfície entre a SAL e a faixa Lageado é atribuída a litologia e ao gradiente hidráulico. No caso da SAL, o mármore possui uma natureza maciça em relação as rochas carbonáticas da faixa Lageado, que possui mais estruturas planares propícias a dissolução, como o acamamento bem preservado.

O valor de Dd obtido neste trabalho é bastante inferior comparado com as áreas cársticas mais próximas (Bombas= 7,45 e Lageado = 2,9), o que leva a afirmar que as faixas Lageado e Bombas apresentam uma carstificação mais intensa. Este dado não está disponível nas outras bibliografias da Tabela 13. Partindo do princípio onde o valor de Dd corresponde à ocorrência de depressões por unidade de área, quanto maior for o valor de Dd, maior será o número de depressões por área. No caso da SAL, estas feições são amplas e extensas, assim o valor de Dd é menor em relação as outras faixas carbonáticas.

A semelhança entre a SAL e as áreas a Itaiacoca e Caboclos é mais próxima, ambas constituem áreas de planalto, com depressões amplas e menos dissecadas.

Figura 38: Comparação das texturas do carste poligonal de diferentes unidades carbonáticas do alto vale do Ribeira.

Tabela 13: Comparação de índices morfométricos da SAL com outras áreas cársticas do vale do Ribeira e Paranapanema.

Fonte	Local	Área de rochas carbonáticas (km ²)	Altitude Máxima (m)	Altitude Mínima (m)	Área de carste poligonal (km ² , %)	Dens. de depressões por área de CP (dep./km ²)	Nº de sumidouros autogênicos	Dens. de sumidouros autogênicos por rea de carbonatos (sum./km ²)	Nº de depressões	Depressões poligonais		
										Área média (km ²)	Perímetro Médio (km)	Amplitude Média (m)
Este trabalho	André Lopes	68,26	840	335	34,04 49,86	1,56	59	0,86	53	0,64	3,13	95,2
Karmann (1994)	Alto Ribeira, área Furnas-Santana	27,45	-----	-----	10,36	7,72	173	6,3	80	0,13	-----	-----
	Alto Ribeira, área Lajeado-Bombas	47,1	-----	-----	26,83	13,08	699	14,8	351	0,076	1,22	-----
Ferrari et al. (1998)	Alto Ribeira, área Caboclos	48,64*	845	215	-----	-----	-----	-----	98	0,16	2,06	138,15
Hiruma et al. (2007)	Itaiacoca, área Nova Campina	-----	900	700	-----	-----	-----	0 a 5	37	0,0972** 0,1791***	1,077** 1,681***	27,3** 80,9***
	Itaiacoca, área Bom Sucesso	-----	900	700	-----	-----	-----	>10	112	0,0418** 0,8814***	0,738** 3,116***	23,5** 65,4***

* Área parcial (setor dentro da lente)

** autóctones

*** alóctones

Além das depressões poligonais, os controles litoestruturais condicionam feições de relevo por todo o planalto carbonático. Na zona de contato ocorre uma concentração maior de depressões fechadas, mostrando que esta é uma descontinuidade propícia para a instalação da condutividade subterrânea. Por outro lado, os rios superficiais da porção sudeste da faixa carbonática (Claro e Frias) também estão condicionadas ao contato litológico, onde os canais escoam sobre uma camada de depósitos fluviais. Os planos de foliação e o bandamento composicional do mármore orientam cristas, morfologia de cones residuais, assim como as fraturas NW.

As zonas dos lineamentos Ribeira e Lancinha desempenharam um papel fundamental na configuração atual da Serra do André Lopes, a erosão preferencial nestas falhas somado ao rebaixamento da superfície do mármore resultou de certa forma na “manutenção” de uma borda metapelítica entorno do Mármore da Tapagem (Figura 2). As rupturas de relevo (*knickpoints*) instaladas nos canais do Claro, Frias e Ostras fora da área carbonática resultam desta erosão diferencial entre os metapelitos e a zona de descontinuidade dos lineamentos brasileiros que delimitam o Bloco Andorinhas (Lancinha e Ribeira).

Propõe-se que a área de estudos pode ser dividida em dois blocos morfológicos distintos, o bloco Pardo e o bloco Ribeira. No bloco Pardo a região se manteve suspensa preservando os setores Claro e Frias na posição de planalto, como resultado da erosão mais favorável nas linhas de falhas. Com o rebaixamento do mármore, o setor sudoeste ficou confinado e com gradiente hidráulico baixo, que não foi capaz de erodir a borda metapelítica. Esta situação somada a elementos litoestruturais pode ter gerado uma espécie de aquífero cárstico confinado, com água de circulação subterrânea mais carbonatadas, como foi descrito anteriormente no item 3.1. Pode-se atribuir que pelo fato do gradiente hidráulico menor do bloco Pardo ser relativamente baixo (ver Tabela 12), a porosidade secundária do mármore é menos desenvolvida, fato também que explica a ausência de sistemas de cavernas.

No bloco Ribeira o rio Ribeira proporciona um incremento hidráulico maior em relação ao bloco Pardo. A erosão remontante da margem direita deste rio associado ao entalhamento preferencial do relevo no lineamento Ribeira, influência diretamente nos altos valores de gradiente hidráulico e no maior entalhamento da superfície nos setores que tem o rio Ribeira como nível de base. No mapa geológico de Faleiros et al. (2013) (Figura 2), existe indicação de falhas aproximadas com direção NW na porção nordeste

da lente carbonática que condicionam o vale do rio Tapagem (VCt) e vale do rio das Ostras (VFo).

No caso do VFo, o gradiente hidráulico mais acentuado somado a fatores como a menor largura da lente carbonática, a presença de recarga alogênica e o controle estrutural a favor do entalhamento do vale, possibilitou o desenvolvimento de um “*through valley*”. Segundo Ford e Williams (2007) estas feições correspondem a vales fluviais que atravessam áreas cársticas quando a descarga alogênica, associada ao alto gradiente hidráulico destes rios, excede a capacidade de desenvolvimento da drenagem subterrânea, gerando o entalhamento da área carbonática pela drenagem superficial. Como resultado, este bloco apresenta valores de gradiente hidráulico bem maiores em relação ao bloco Pardo, além disso, a presença de recarga alogênica nesta área aumenta a capacidade corrosiva da água.

Nas áreas cársticas descritas por Karmann (1994), o carste é bastante dissecado e a porosidade secundária mais desenvolvida devido ao alto gradiente hidráulico do rio Betari, que entalhou de forma perpendicular as lentes carbonáticas, assim como o do rio das Ostras em relação ao Mármore da Tapagem. No caso do rio Betari o entalhamento ocorreu na zona de fratura associadas ao dique de diabásio (Karmann, 1994).

De fato, o entalhamento acentuado do vale do rio das Ostras acelerou a abertura e desenvolvimento da porosidade secundária nesta porção do planalto, além de reorganizar o traçado de drenagens superficiais para rotas subterrâneas, como é o caso do rio Tapagem (item 3.4). Na área do VCt, este entalhamento expôs ainda mais os metapelitos aumentando gradativamente a taxa de descarga alogênica (água corrosiva) e consequentemente o aumento da capacidade de ampliação e entalhamento da drenagem subterrânea.

5.2 Gruta da Tapagem

O desenvolvimento da Gruta da Tapagem resultou no sistema de drenagem subterrânea ímpar do planalto carbonático do André Lopes. Sua formação foi possível devido à soma de condições geomorfológicas e estruturais favoráveis para a espeleogênese e para o entalhamento vadoso.

O entalhamento preferencial do rio das Ostras sobre uma zona de fraturas NW-SW, transformou este rio no nível de base do aquífero cárstico do setor nordeste do planalto, e da unidade de carste poligonal CPto. No trabalho de Karmann (1994), a integração entre a análise de relevo e os estudos geoespeleológicos mostrou que a

zona de carste poligonal mais desenvolvida reflete na presença de condutos associados a sistemas de cavernas em profundidades de até 200m abaixo da superfície.

O alto valor do gradiente hidráulico do rio das Ostras e a presença de recarga alogênica na bacia do rio Tapagem favoreceram o início da espeleogênese. Segundo Palmer (2001) a iniciação e o alargamento de condutos por águas provenientes de rochas não carbonáticas é mais acentuado, isto devido a uma característica mais corrosiva que gera alta capacidade de dissolução da rocha. O aumento na eficiência da drenagem subterrânea somado ao rebaixamento do nível da água, teve como resultado, a captura do rio Tapagem para uma rota de fluxo subterrânea pré-existente, passando então, a ser o principal afluente do rio das Ostras no planalto. Este contexto se enquadra no conceito de cavernas de invasão vadosas, segundo Ford e Williams (1989), se formam a partir da absorção de um rio superficial pela rocha carbonática que já era drenada anteriormente em fazes mais iniciais da espeleogênese.

A área do contato litológico entre o mármore e os metapelitos foi o ponto preferencial para a instalação e ampliação da rota de fluxo subterrânea, uma vez que o filito também serve de bloqueio e funciona como barreira e para a água do carste.

No modelo evolutivo do desenvolvimento de sistemas de cavernas denominado de “Four State Model” (Ford e Ewers, 1978; Ford, 2000), ocorrem quatro fases principais no desenvolvimento de uma cavidade, considerando as dimensões de comprimento e profundidade (Figura 39). O Estágio 1 (*Bathypheatic cave*) é representado por pequenas fissuras na zona freática, devido à baixa permeabilidade da rocha, apresenta alta resistência hidráulica. O Estágio 2 (*Multiple-loop phreatic cave*) é necessária uma permeabilidade considerável e para dar início ao rebaixamento do nível da água. Os topos dos *loopings* estão preenchidos de ar. No Estágio 3 há uma mistura de *loopings* curtos, longos e canais quase horizontais. Já no Estágio 4 (*ideal water table caves*), a frequência de aberturas é alta e o nível da água já rebaixou o suficiente para criar rotas eficientes, podendo drenar todo o escoamento da bacia. Seguindo este modelo evolutivo a Gruta da Tapagem está enquadrada no último estágio evolutivo.

No processo de abertura de condutos por entalhamento vadoso predomina o fluxo turbulento (escoamento livre gravitacional), onde condutos freáticos são entalhados e evoluem para cânions de paredes verticais (Palmer, 1991). O entalhamento vadoso ocorre no topo da zona saturada (nível de base da zona de circulação do carste), ou seja, é a linha de saturação permanente que foi relativamente estável durante diversos estágios de desenvolvimento de uma caverna (Powel, 1970). Os episódios de

rebaixamento do nível de base do carste geralmente são contemporâneos aos episódios geomorfológicos da superfície. Esta morfologia subterrânea ocorre também nas cavernas de outros corpos carbonáticos do vale do Ribeira. Karmann (1994) coloca que o rebaixamento do nível de base foi controlado pelo soerguimento tectônico regional iniciado no final no início do Terciário e posteriormente com a subsidência do Gráben de Sete Barras.

Figura 39: Modelo espeleogenético "Four State Model". Modelo evolutivo de uma caverna nas dimensões de comprimento e profundidade. Retirado de Ford, D.C (2000).

Feições de iniciação da espeleogênese na Gruta da Tapagem não foram observadas. Considera-se que são raras na caverna, pois em sua maior parte já foram alterados por processos de incisão ou encontram-se nos níveis superiores, onde o acesso é extremamente restrito. O comportamento sinuoso da caverna em planta é controlado em sua maior parte pelo bandamento do mármore. Trechos mais angulosos com flexão do conduto do rio para NW-SE como na Galeria do Rio (entre o $\Delta 9$ e $\Delta 11$), na Avenida dos Macarrões e as flexões próximas a passagem da Diáclase, o controle de se dá preferencialmente por fraturas de ruptura do enxame de diques. Segundo Palmer (1991), as cavernas curvilíneas em planta geralmente seguem o acamamento e condutos com conexões mais angulares tendem a seguir juntas e falhas. É importante salientar que, nos locais de ocorrência dos diques de diabásio, não houve controle ou condicionamento na orientação do conduto, e sim um rompimento total dos diques. Talvez durante o desenvolvimento da passagem, o dique serviu de barreira induzindo uma ampliação pontual, como no caso do Dique 2, o mais espesso.

O controle hidráulico (regime de fluxo) da rota de fluxo controla o desenvolvimento morfológico em seção transversal (Karmann, 1994). As formas principais geradas quanto ao regime de fluxo são o entalhamento vadoso (fluxo turbulento com abrasão mecânica e dissolução) e o alargamento freático (fluxo laminar e dissolução). Na Gruta da Tapagem ocorrem entalhamento vadoso e alguns condutos de transição entre o vadoso e o freático (Figura 40). A morfologia de cânion subterrâneo na caverna é um produto da ampliação do conduto por processos de rebaixamento do nível de base e entrincheiramento vadoso, ou seja, a caverna evoluiu a partir da dissolução do piso para baixo (Ford e Williams, 2007).

Os cânions tendem a ser verticais ou pouco inclinados, e quando inclinado tem caimento para NW e para NE (Anexo 3), condicionado ao mergulho do bandamento do mármore, mais do que ao gradiente hidráulico do rio Ribeira.

A metade inicial da caverna (porção SW) possui bandamento vertical e com caimento para NW, e o cânion no geral é vertical ou inclinado para NW. Já na metade final (porção NE), o cânion é, na maior parte, inclinado para SE, seguindo o bandamento do mármore com mergulho neste sentido. Na porção central da caverna, há uma inflexão de 90 graus, onde a caverna seguia no rumo NE, segue para SE, e é justamente onde os mergulhos mudam de direção de caimento de NW para SE. A galeria do rio neste setor é perpendicular ao acamamento. Nitidamente neste ponto de inflexão há alguma estrutura rúptil condicionante, como uma fratura ou falha, podendo

ser relacionada aos diques e estruturas associadas. Porém, a estrutura em si não foi observada.

Figura 40: Morfologia em seção transversal da Gruta da Tapagem. Representação das seções com a atitude das estruturas geológicas (E.L.I – entalhamento lateral intenso).

No Setor C da caverna, as galerias representam a migração da drenagem principal com o encontro de alguns afluentes, que resulta em uma área labiríntica (Palmer, 1975) ambos condicionados por fraturas (NW-SE) ou pela foliação do mármore. Corresponde a um local com alto controle estrutural, onde a ocorrência de diversas fraturas induz o colapso e a formação de galerias muito controladas. Neste setor a morfologia da caverna passa de uma galeria de rio meandrante para um padrão labiríntico, se considerar todas as galerias e níveis em planta. Mas ao analisarmos apenas a galeria do rio do Setor C, ela ainda permanece uma galeria de rio meandrante.

Os abatimentos podem ter sido os responsáveis pela migração e desvio da drenagem. White e White (2000) afirmam que blocos abatidos truncam passagens fragmentando os condutos longos e contínuos em diversos segmentos menores. Em condutos amplos durante a fase de desenvolvimento, os colapsos podem fornecer um suporte estrutural para a formação de barragens, forçando a migração dos rios para novas passagens subterrâneas. Na fase de estagnação e decaimento do desenvolvimento da caverna, os colapsos podem conectar níveis antes isolados e formar um sistema de passagens interconectadas. O final da fase de decaimento é o conduto de abatimento que ocorre quando a erosão da superfície intercepta o domo de estresse da rocha no teto da caverna.

O grande depósito de sedimento colúvio-eluvial presente na parte turística da caverna (Bolo de Noiva, Setor A) pode ser interpretado como um antigo ponto de injeção vadosa, atualmente há uma inversão do relevo na superfície, pois, onde antes um antigo fundo de depressão possibilitou a injeção pretérita de solo e blocos na caverna e, atualmente, ocorrem morros na superfície. Na topografia acima do eixo longitudinal da caverna ocorre uma área deprimida entre duas cristas NW-SE, com um pacote de aproximadamente 60m de rocha entre a caverna e a superfície. Isto pode ser reflexo da influência dos diques (2 e 3), que geraram um maior fraturamento neste ponto. Cabeceiras de drenagem que escoam para o rio Ribeira estão instaladas na área deprimida, assim, com a erosão do relevo, pode ocorrer a segmentação da caverna no futuro.

Trabalhos futuros com a utilização de técnicas de datação de sedimentos e espeleotemas serão necessários para estabelecer uma cronologia dos eventos que desenrolaram sua história evolutiva.

6 CONCLUSÕES

O estudo do carste da região da Serra do André Lopes possibilitou o entendimento das características do sistema cárstico que vem se desenvolvendo no Mármore da Tapagem e uma compreensão mais detalhada do contexto geológico da Gruta da Tapagem e dos processos envolvidos na evolução da cavidade. As principais conclusões deste estudo são:

- Ocorrem três unidades morfológicas principais no carste, o carste poligonal, vale cego e vales fluviais, que foram subdivididas em setores de acordo com o fluxo superficial e o fluxo subterrâneo inferido. Dentre estas unidades, considerou-se que o carste poligonal e o vale cego compõem o carste em si, que ocupa cerca de 38,56% da área exposta de rochas carbonáticas.
- A recarga do carste é predominantemente autogênica (82%).
- No setor centro-sudeste da SAL, os vales fluviais predominantes sobre as rochas carbonáticas são vales encaixados no contato litológico e de baixo gradiente hidráulico. No setor nordeste predominam vales bastante entalhados, de alto gradiente hidráulico, encaixados preferencialmente em fraturas de direção NW.
- A vale fluvial do Rio das Ostras drena de forma perpendicular a lente carbonática, formando um *through valley*.
- No carste foram identificadas e mapeadas feições como depressões poligonais, dolinas, cones cársticos, cavernas, sumidouros, vale cego, nascentes, ressurgências e tufas.
- O carste poligonal ocupa cerca de 88,27% da área cárstica, e tem como características depressões amplas, com alta amplitude, de fundo plano e fortemente controladas estruturalmente.
- As direções predominantes observadas no relevo são NE-SW e SW-NE, associadas à direção dos planos de foliação/bandamento do mármore e ao sistema de fraturas associados aos diques de diabásio mesozoicos do Arco de Ponta Grossa.
- Cavernas são raras e concentram-se no setor nordeste, na bacia dos rios Tapagem/Ostras. Destacam-se o sistema Rolado, Gruta Fria e a Gruta da Tapagem.
- A origem e a evolução da Gruta da Tapagem estão associadas com o alto gradiente do rio Ribeira e o entalhamento acentuado do rio das Ostras, que se

tornou o nível de base principal do aquífero cárstico do setor Tapagem/Ostras. Na medida em que ocorria o rebaixamento do relevo, parte da bacia do rio Tapagem foi capturada por rotas subterrâneas pré-existentes, formando o Vale Cego da Tapagem.

- A Gruta da Tapagem possui morfologia em planta de galeria de rio meandrante, intercalada com salões de abatimento e um trecho labiríntico. Em perfil, os condutos se apresentam de forma geral como cânions vadosos e salões de abatimento. Feições de transição de ambiente freático para vadoso ocorrem, porém são raras e pontuais.
- Na Gruta da Tapagem foram identificados que o bandamento do mármore (NE-SW), a clivagem ardosiana (plano axial) e fraturas mesozoicas (NW-SE) são os principais condicionantes da morfologia da caverna em planta. Os condutos em perfil são fortemente condicionados pelo mergulho do bandamento, ora para NW, ora para SE, formando uma estrutura antiformal ampla, com dobramentos secundários. Além do controle estrutural, o gradiente hidráulico regional também possui grande influência sobre a morfologia.
- Foram encontrados quatro diques de diabásio mesozoicos na Gruta da Tapagem, que não condicionam diretamente os condutos, mas favorecerem o abatimento e a formação de salões. A caverna cruza perpendicularmente estes diques.
- Não foram observadas feições de iniciação freática na Gruta da Tapagem, apenas o entalhamento vadoso interpretado a partir de evidências morfológicas da caverna.
- Dentro do modelo espeleogenético “Four State Model”, a caverna se enquadra no último estágio evolutivo, o “ideal water table cave”. Onde a rota subterrânea se tornou eficiente o suficiente para drenar todo o escoamento superficial da bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A.N. *Brasil: paisagens de exceção: o litoral e o Pantanal Mato-grossense: patrimônios básicos*. Cotia, SP: Ateliê Editorial, 2006. 182p.
- ALMEIDA, F.F.M. Evolução tectônica da borda continental na região da Serra do Mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, 1973. Aracaju, *Anais...* Aracaju: SBG, 1973. p.184-185.
- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, v. 7, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, F.F.M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozoico. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, v. 16, n. 4, p. 325-349, 1986.
- ALMEIDA, F.F.M. Origem e Evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
- ALMEIDA, L.H.S. *Caracterização geológica e hidrogeológica de Tufas da serra do André Lopes, municípios de Eldorado e Barra do Turvo (SP)*. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- AULER A.S.; RUBBIOLI E.L.; BRANDI, R. *As Grandes Cavernas do Brasil*. Belo Horizonte: Rona, 2001. 230p.
- BRANDI, R. Ricardo Krone e Lourenço Granato: Influências na história da espeleologia paulista no final do século XIX e início do século XX. *O Carste*, v. 19, n. 2, p. 36-60, 2007.
- CAMPANHA, G.A.C.; GIMENES FILHO, A.; VIERIRA CAETANO, S.I.; ALVES PIRES, F.; LUCAS DANTAS, A.S.; TEIXEIRA, A.L.; DEHIRA, L.K.; HACHIRO, J.; STEFANI, F.L. *Geologia das folhas Iporanga (SG:22-X-B-V-2) e Gruta do Diabo (SG:22-X-B-VI-I)*. Estado de São Paulo, PROMINÉRIO/ IPT, Report 22.352, 1985.
- CAMPANHA, G.A.C. *Tectônica Proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná*. 1991. 296 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- CAMPANHA, G.A.C.; SADOWSKI, G.R. Tectonics of Southern portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). *Precambrian Research*, v. 98, p. 31-51, 1999.
- CAMPANHA, G.A.C. O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrente da porção meridional da Faixa Ribeira. 2002. 105 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- CECAV. Cavernas: Base de Dados Geoespacializados de Cavidades Naturais Subterrâneas do CECV/ICMBIO, situação em Fevereiro de 2012. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecv/downloads/mapas.html>>. Acesso em: 03/03/2013.

- CHRISTOFOLETTI, A. Considerações sobre o nível de base, rupturas de declive, capturas fluviais e morfogênese do perfil longitudinal. *Geografia*, v. 2, n. 4, p. 81-102, 1977.
- CORDEIRO, B.M; SALLUN FILHO, W; KARMANN, I. Aspectos geológicos e geomorfológicos da Gruta da Tapagem (Estado de São Paulo, Brazil). In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOCIÊNCIAS NA CPLP, I. *Anais...* Portugal: Universidade de Coimbra, Portugal, 2012. p. 121.
- COUTINHO, J.M.V. Dyke Swarms of the Paraná Triple Junction, Southern Brazil. *Revista do Instituto de Geociências*, Universidade de São Paulo, São Paulo, v.8, n. 2, p. 29-52, 2008.
- DAY, M. The morphology and hydrology of some Jamaica karst depressions. *Earth-Surface Processes*, v.1, n.2, p. 111-129, 1976.
- ERNESTO, M.; RAPOSO, M. I. B.; MARQUES, L. S.; RENNE, P. R.; DIOGO, L. A.; DE MIN, A. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Northeastern Paraná magmatic province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, v.28, p. 321-340, 1999.
- FALEIROS, F.M.; MORAIS, S.M.; COSTA, V.S. Unidades litoestratigráficas. In: FALEIROS, F.M.; COSTA, V.S. (Orgs.). *Geologia e recursos minerais da folha Apiaí, SG.22-X-B-V, estados de São Paulo e Paraná*. São Paulo: CPRM, 2012. Escala 1:100.000.
- FALEIROS, F.M.; MORAIS, S.M.; COSTA, V.S. Unidades litoestratigráficas. In: FALEIROS, F.M.; COSTA, V.S. (Orgs.). *Geologia e recursos minerais da folha Elorado, SG.22-X-B-VI, estados de São Paulo e Paraná*. São Paulo: CPRM, 2013. Escala 1:100.000.
- FIGUEIREDO, L.A.V.; ZAMPAULO, R.A.; GERIBELLO, F.K.; PEDRO, E.G.; DELL'ANTONIO, R.; LOBO, H.A.S. Projeto Caverna do Diabo (PROCAD): Aspectos históricos (1990-2007) e resultados das expedições da terceira fase. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29., 2007. Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto: CBE, 2007. p. 113-119. Disponível em: <http://cavernas.org.br/anais29cbe/29cbe_113-119.pdf>.
- FERRARI, J.A., HIRUMA, S.T. AND KARMANN, I. Caracterização morfométrica de uma superfície cárstica do Vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Caboclos PETAR). *Revista do Instituto Geológico*. v.19, p.9-17, 1998.
- FORD, D.C. Speleogenesis under unconfined settings. In: *Speleogenesis; Evolution of Karst Aquifers*. Orgs: Klimchouk, A.V.; Ford, D.C.; Palmer, A.N.; Dreybrodt, W. National Speleological Society of America, Huntsville, AL, pp. 319-24, 2000.
- FORD, D.C.; EWERS, R.O. The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *Journal of Speleology*, v.10, p. 213-244, 1978.
- FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester: Wiley, 2007. 561p.

- FRANCO-MAGALHÃES, A.O.B.; HACKSPASHER, P.C.; SAAD, A.R. Exumação Tectônica e reativação de paleolimentos no Arco de Ponta Grossa: termocronologia por traços de fissão em apatita. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 2, p. 184-195, 2010.
- FUNDAÇÃO FLORESTAL. 2010. Plano de Manejo Espeleológico: Caverna do Diabo. Disponível em: <http://www.fflorestal.sp.gov.br/plano_de_manejo_espeleologicos.php>.
- GUNN, J. Hidrological processes in karst depressions. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Neue Folge, v.25, n.3, p. 427-455, 1981.
- GOODCHILD, M.F.; FORD, D.C. Analysis of scallops patterns by simulation under controlled conditions. *Journal of Geology*, v.79, p. 52-62, 1971.
- HASUI, Y.; HENNIES, W.T.; IWANUCH, W. Idades potássio argônio da região centro norte do Brasil. *Boletim do Instituto Geológico*, v. 6, p. 77-83, 1975.
- HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. In: HASSUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. (Orgs). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, p. 331-371, 2012.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.C. A Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B. (Orgs). *O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, 2004. p. 203-234.
- HIRUMA, S.T.; FERRARI, J.A.; AMARAL, R.; HONÓRIO, R.F. Mapeamento e caracterização das feições cársticas de superfície na Faixa Itaiacoca nas regiões de Nova Campina e Bom Sucesso de Itararé, SP/PR. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, v. 27-28, n. 1/2, p. 1-12, 2007.
- HIRUMA, S.T.; FERRARI, J.A.; AMARAL, R. Caracterização de feições cársticas de superfície da Faixa André Lopes (Vale do Ribeira, SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA-SBG, 44., 2008. Curitiba. *Anais...* Curitiba:CBG, 2008. p. 993.
- IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO (São Paulo). Projeto Vale do Ribeira II: mapas topográficos. São Paulo, 1989. Escala 1:10.000.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio e Tecnologia do Estado de São Paulo e IPT. (Publicação IPT nº 1184). Escala 1:500.000.
- JENNINGS, J.N. *Karst Geomorphology*. Oxford: Basil Blackwell, 1985. 293p.
- KARMANN, I. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo*. 1994. 228 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

- KARMANN, I. ; FERRARI, J. A. Sítios Espeleológicos - Carste e Cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira. In: SCHOBEBBHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BEBERT-BORN, M.L.C. (Org.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília: DNPM, v. 1, p. 401-413, 2002.
- KARMANN I.; SANCHEZ L.E. Speleological Provinces in Brazil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 9., 1986. Barcelona. *Anais....*Barcelona: IUS, 1986. v.1, p. 151-153. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v22_n1.pdf>.
- KRONE, R. As grutas calcareas de Iporanga. *Revista do Museu Paulista*, v.3, p. 477-500, 1898.
- KRONE, R. Grutas calcareas do Valle da Ribeira. *Revista do Centro de Ciencias, Letras e Artes de Campinas*, v.2, p. 90-95, 1904.
- KRONE, R. Estudo sobre as cavernas do Valle do Ribeira. *Arquivos do Museu Nacional*, v. 15, p. 139-166, 1909.
- KRÜGER, M.V. A gruta da Tapagem – II parte. *Revista da Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 25, n. 4, p.173-177, 1967.
- LE BRET, M. Estudos espeleológicos no Vale do Alto da Ribeira. *Boletim do Instituto Geográfico e Geológico*, n. 47, p. 71-123, 1966.
- LEIGHTON, M.W.; PENDEXTER, C. Carbonate rock types. In: HAM, W.E. Classification of carbonate rocks. *American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, USA, v. 1, p. 33-61, 1962.
- LOBO, H.A.S.; SALLUN FILHO, W.; VERISSIMO, C.U.V.; TRAVASSOS, L.E.P.; FIGUEIREDO, L.A.V.; RASTEIRO, M.A. Espeleoturismo: Oferta e demanda em crescente expansão e consolidação no Brasil. In: CASTRO, S.F.L. de; SOUTO, W. (orgs.) *Segmentação do Turismo: Experiências, Tendências e Inovações - Artigos Acadêmicos*. Brasília: Ministério do Turismo, v.1, p.35-58, 2010.
- LOBO, H.A.S.; TRAJANO, E.; MARINHO, M.A.; BRICHUETTE M.E.; CALEANTE, J.A.B.; SCALEANTE, O.A.F.; ROCHA, B.N.; LATERZA, F.V. Projection of tourist scenarios onto fragility maps: Framework for determination of provisional tourist carrying capacity in a Brazilian show cave. *Tourism Manangement*, v. 35, p. 234-243, 2013.
- MARINHO, M.A. *Contribuição a Geomorfologia Carstica do Vale do Betari, Iporanga e Apiaí, SP*. 1992. 73 f. (Monografia) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- MARTINET, B.; SOUGY, J. Utilisation pratique des classifications chimiques des roches carbonatées. *Annales de La faculté des sciences de l'Université de Dakar*, v. 6, p. 81-92, 1961.
- MATOS, F.A. A gruta da Tapagem (“Caverna do Diabo”). *Revista da Escola de Minas*, v. 24, n. 3, Ouro Preto, p.1-8, 1966.

- MORAES, M.C. Sedimentologia dos depósitos cenozóicos continentais do Baixo Vale do Rio Ribeira do Iguape, SP. *Revista do Instituto de Geologia*, v. 12, n. 1-2, p. 39-53, 1991.
- OLIVEIRA, D. Capturas fluviais como evidências na evolução do relevo: uma revisão bibliográfica. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 20, p. 37-50, 2010.
- PALMER, A.N. Origem and morphology of limestone caves. *Geological society of American Bulletin*, v.103, p. 1-21, 1991.
- PALMER, A.N. Dynamics of cave development by allogenic water. *Acta Carsologica*, v. 30, n. 2, p. 14-32, 2001.
- PALMER, A.N. *Cave Geology*. Dayton, Ohio: Cave Books, 2007. 288p.
- PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, IPT, v. I, n. 1183, 1981.
- POWEL, L. R. Base level, lithologic and climatic controls of karst groundwater zones in South-central Indiana. *Proceedings of Indiana Academy of Science*, v.79, p.281-291, 1970.
- RENNE, P.R.; DECKART, K.; ERNESTO, M.; FEÂRAUD, G.; PICCIRILLO, E.M. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Parana flood volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, n.144, p. 199-211, 1996.
- RICCOMINI, C. *Tectonismo gerador e deformador dos episódios sedimentares pós-gondvânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas*. 1995. 100 f. Tese (Livre Docência) Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. (Orgs.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio de Almeida*. São Paulo: Beca, p. 383-405, 2004.
- RODRIGUES, R. Projeto Caverna do Diabo. *Informativo SBE-Sociedade Brasileira de Espeleologia*, n. 79, p. 15-19. Campinas, 2002.
- ROSS, J.L.S.; MOROS, I.C. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: FFLCH – USP/ IPT/ FAPESP, 1997.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Agricultura. *Fotoíndice do Vale do Ribeira*, SG.22-X-B-V. São Paulo, 1973a. Escala aproximada 1:100.000.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Agricultura. *Fotoíndice do Vale do Ribeira*, SG.22-X-B-VI. São Paulo, 1973b. Escala aproximada 1:100.000.
- SÃO PAULO. Decreto n. 48.818, de 08 de novembro de 1967. *Diário Oficial Estado de São Paulo*, São Paulo, ano LXXVII, n. 212, p. 2, 1967.

- SALLUN FILHO, W.; ALMEIDA, L.H.S.; TORRESI, B. F.; GOUVEIA, F. R. N.; PERSON, A. L. Caverna do Rio Fria (sp-40) revisitada 100 anos depois de Krone: história e geologia de uma caverna formada pelo crescimento de tufa. *Espeleo-Tema* (São Paulo), v. 22, p. 7-23, 2011.
- SALLUN FILHO, W.; CORDEIRO, B.M.; KARMANN, I. Karst geology and geomorphology of the André Lopes carbonate plateau, southeastern Brazil. In: PROCEEDINGS OF 34TH INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 34., 2012. Brisbane. *Anais...* Brisbane: IGC, p. 527, 2012a.
- SALLUN FILHO, W.; ALMEIDA, L.H.S.; BOGGIANI, P.C.; KARMANN, I. Characterization of quaternary tufas in the Serra do André Lopes karst, southeastern Brazil. *Carbonates and Evaporites*, v. 27, p. 357-373, 2012b.
- SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I. Províncias cársticas e cavernas no Brasil. In: HASSUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. (Orgs). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, p. 629-641, 2013.
- SALLUN FILHO, W. *Geomorfologia e geoespeleologia do carste da Serra da Bodoquena, MS*. 2005. 193 f. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- SILVA, A.T.S.F.; FRANCISCONI, O.; GODOY, A.M.; BATOLLA JR., F. *Projeto integração e detalhe geológico no Vale do Ribeira: Relatório Final - Integração geológica*. CPRM (São Paulo), v1. n1, 1981.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA. *Mapa da Caverna do Diabo*. Campinas: SBE, 1993.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA. *Mapa da Caverna do Diabo*. Campinas: SBE, 2008.
- SOUZA, L.A.P.; TESSLER, M.G.; GALLI, V.S. O Gráben de Cananéia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, n. 3, p. 139-150, 1996.
- VALLE, M. A. Gruta da Tapagem. In: AULER, A.; RUBBIOLO, E.; BRANDI, R. (Orgs.). *As Grandes Cavernas do Brasil*. Belo Horizonte: Grupo Bambui de Pesquisas Espeleológicas, v. 1, p. 136-139, 2001.
- WILLIAMS, P.W. The analysis of spatial characteristics of karst terrains. In: CHROLEY, R.J. *Spatial analysis in Geomorphology*. New York: Haper and Row, p.135-166, 1972a.
- WILLIAMS, P.W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, n. 83, p. 761–796, 1972b.
- WILLIAMS, P.W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, n. 61, p. 45–67, 1983.
- WILLIAMS, P.W. Polygonal karst and paleokarst of the King Country, North Island, New Zeland. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v.136, p.45-67, 2004.

WILLIAMS, P.W. The role of epikarst in Karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, n. 37, p. 1–10, 2008.

WHITE, E.L. Breakdown. In: Culver D.C; White, W.B (Org.). *Encyclopedia of Caves*. USA: Elsevier, p. 56-60, 2005.

WHITE, E.L.; WHITE, W.B. Breakdown Morphology. In: *Spheleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Orgs: KLIMCHOUK, A.V.; FORD, D.C.; PALMER, A.N.; DEYBROUDT, W. National Speleological Society of America, Huntsville, AL, p. 427-429, 2000.

ZALÁN, P.V.; OLIVEIRA, J.A.B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências Petrobrás*, v. 13, n. 2, p.269-300, 2005.

ZÍLIO, C. Nas pegadas de Krone (1861-1918) – 1º Parte. *Informativo SBE*, n. 87, p. 25-26, 2003a.

ZÍLIO, C. O Coronel e a Caverna. *Informativo SBE*, n. 87, p. 27, 2003b.

ANEXOS

- 1- Mapa geomorfológico do carste da Serra do André Lopes**
- 2- Mapa Geoespeleológico e Perfis Transversais da Gruta da Tapagem**
- 3- Perfis transversais e longitudinal da Gruta da Tapagem**

Anexo 1: Mapa geomorfológico do carste da Serra do André Lopes

Planalto carbonático do André Lopes (SP): geomorfologia cárstica e geoespeleologia da Gruta da Tapagem (Caverna doDiabo)

Bruna Medeiros Cordeiro
Orientador: William Sallun Filho

Dissertação de Mestrado
Instituto de Geociências - USP
2013

- Legenda:**
- drenagem
 - crista
 - escarpa
 - Mármore da Tapagem
- Feições cársticas**
- nascente cárstica
 - ressurgência
 - sumidouro conferido
 - sumidouro fotointerpretado
 - sumidouro em banhado
 - lagoa
 - tufas
 - cone
 - dolina
- Sector Claro**
- Unidades
- carste poligonal do Claro - CPc
 - vale fluvial do Claro - VFc
- Sector Frias**
- Unidades
- vale do Rio Frias - VFf
 - carste poligonal do Frias - CPf
- Sector Arivá**
- carste poligonal do Arivá - CPa
- Sector Tapagem/Ostras**
- Unidades
- vale cego da Tapagem - V Ct
 - carste poligonal das Ostras - CPo
 - carste poligonal da Tapagem - CPt
 - vale do Rio das Ostras - VFO
 - carste poligonal do Marcos - CPM
- Sector Sapatú**
- carste poligonal do Sapatú - CPs

Cavernas

- ▲ **Código CNC - Nome**
- SP-2 - Gruta da Tapagem (Caverna do Diabo)
sumidouro da Tapagem e ressurgência das Ostras
- contorno da caverna
- SP-79 - Gruta Fria
SP-324 - Gruta do Rolado I

- SP-324 - Gruta do Rolado II
SP-324 - Gruta do Rolado III
SP-690 - Gruta do Marcos
SP-718 - Abismo do Ládio
SP-719 - Abismo Pedra Branca

- SP-720 - Gruta do Miltinho
SP-727 Nascente Rio das Pedras
SP- 728 - Gruta Sapatu II
SP-729 Gruta Sapatú III

Mapeamento aerofotogramétrico em escala 1: 25.000
Fotografias aéreas da Secretaria da Agricultura - SP (1972-1973)
Rede de drenagem regional extraída de IGC (1998)
Dados topográficos - SRTM (2013)
Geologia extraído de Faleiros (2013)

Anexo 2: Mapa Geoespeleológico e Perfis Transversais da Gruta da Tapagem

*Planalto carbonático do André Lopes (SP):
geomorfologia cárstica e geoespeleologia da Gruta
da Tapagem (Caverna do Diabo)*

Bruna Medeiros Cordeiro
Orientador: William Sallun Filho

Dissertação de Mestrado
Instituto de Geociências - USP
2013

Desenho e Mapa Original:
Sociedade Brasileira de Espeleologia
(SBE, 2008))
Gruta da Tapagem - SP 002

Localização(UTM)
Datum (WGS84)
Sumidouro: 7272654S/763171W
Ressurgência:7273687S/765027W
Entrada da OTRAS:7273809S/765039W

Projeção Horizontal: 6.237m
Desnível: 175m
BCRA: Grau 4B

Perfis e Compilação Final:
Bruna Medeiros Cordeiro
William Sallun Filho

Equipe de Campo:
Josias Moreira
Juliane Jamile da Silva Pereira
Valdomiro Pereira

LEGENDA:

- drenagem
- desnível
- estalagmite
- estalactite
- estalactite e estalagmite
- cortina
- coluna
- escoamento
- travertino
- bloco
- base topográfica
- acamamento
- fratura
- dique
- escarpa

↑
NG

100m

Anexo 3: Perfis transversais e longitudinal da Gruta da Tapagem

Bruna Medeiros Cordeiro
Orientador: William Sallun Filho

Dissertação de Mestrado
Instituto de Geociências - USP
2013

*Planta da Gruta da Tapagem
e localização dos perfis*

Desenho e Mapa Original:
Sociedade Brasileira de Espeleologia
(SBE, 2008)
Gruta da Tapagem - SP 002

Localização(UTM)
Datum (WGS84)
Sumidouro: 7272654S/763171W
Ressurgência:7273687S/765027W
Entrada da OTRAS:7273809S/765039W

Projeção Horizontal: 6.237m
Desnível: 175m
BCRA: Grau 4B
Edição Final : Marcos Silvério

NE

LEGENDA:

- drenagem
desnível
espeleoter
bloco
base topog
dique
depósito fl

Perfis Transversais e Longitudinal:
Bruna Medeiros Cordeiro
William Sallun Filho

Equipe de Campo:
Josias Moreira
Juliane Jamile da Silva Pereira
Valdomiro Pereira