UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

Caracterização das formações superficiais do Carste de Lagoa Santa: um estudo de caso da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa (Município de Lagoa Santa, Minas Gerais)

ALBERTO BARIONI

São Paulo

2018

ALBERTO BARIONI

Caracterização das formações superficiais do Carste de Lagoa Santa: um estudo de caso da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa (Município de Lagoa Santa, Minas Gerais)

Versão Original

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Colangelo

Co-orientador: Dr. Augusto Sarreiro Auler

São Paulo

2018

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

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

B223c

Barioni, Alberto
Caracterização das formações superficiais do Carste de Lagoa Santa: um estudo de caso da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa (Município de Lagoa Santa, de Minas Gerais) / Alberto Barioni ; orientador Antonio Carlos Colangelo. - São Paulo, 2018.
134 f.

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

1. Carste. 2. Carstologia. 3. Geomorfologia. 4. Pedologia. I. Colangelo, Antonio Carlos, orient. II. Título.

Nome: Barioni, Alberto

Título: Caracterização das formações superficiais do Carste de Lagoa Santa: um estudo de caso da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa (Município de Lagoa Santa, Minas Gerais)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta complexa tarefa não seria possível sem a participação direta, ou indireta de uma significativa gama de pessoas e instituições, de forma que já adianto as desculpas para o caso do esquecimento de algum nome.

Ao meu pequeno e discreto, porém afetuoso e querido, núcleo familiar resumido à uma mãe, uma avó, dona Odete e dois cachorros, por todo carinho e apoio despendidos e a meu pai, que mesmo partindo tão cedo, foi o responsável por despertar minha curiosidade acerca das ciências da natureza.

À Melissa pelo amor e compreensão, especialmente neste momento distinto da minha vida.

Meu conterrâneo, companheiro de café, amigo e claro, orientador, Colangelo, por acreditar, dar liberdade e principalmente trazer, serenamente, esclarecimentos em momentos críticos da pesquisa.

Ao meu co-orientador, o Dr. Augusto Auler, pela disposição e entusiasmo em me apoiar desde 2014, quando esta pesquisa ainda era um esboço totalmente diferente do que se tornou. Por sempre estar disponível, fosse em campo, escritório da Carste, internet nos não raros momentos de dúvida, dividindo seu enorme conhecimento sobre a Carstologia sempre com uma boa referência em mãos, além de disponibilizar recursos materiais e financeiros de sua empresa.

Ao Fernando Laureano pela prestatividade de quem diversas vezes, esteve em campo comigo sanando as diversas dúvidas acerca dos depósitos de cavernas. Ivo Karmann como grande mestre quando se fala de cavernas.

Ao povo da Geomorfologia da USP, Marilda, Yuri, Iury, Camila, Ritinha, Pamela, Michele, Ciça, Juvena e seus professores, Dr. Jurandyr Ross, Dr. Fernando Nadal e Drª Cleide Rodrigues, por sempre trazer alguma informação importante da Ciência do Relevo.

Ao povo do LAAAE, Max, Rodrigão, Lisi, Mari, Andersen e do professor Dr Ruy Murrieta, pelos apoios institucional, de campo e de copo!

Aos “Andrios” pelo apoio na elaboração dos mapas, ao Marcos, pelas discussões trazidas sobre os resultados das análises dos solos e a Juliana Mantovani pelo, nem um pouco simples, processamento das imagens obtidas com o Drone, ao Pânico pelas informações sobre coleta de sedimento e a amiga nova e já queridíssima, Le(u)da Zogbi, pelo mapa da Vargem da Lapa e mapeamento e mapa da Lapa do Beijo aos 48 do segundo tempo!

Ao pessoal de Minas Gerais, Josi, Aline Guerra e Jussara, sr Wellington, sr Elcimar e sua família, dona Lurdinha e s. Nilton e Juninho, além do apoio do Grupo Bambuí, que gentilmente forneceu bussolas e trenas para o mapeamento das grutas. Também aos funcionários do Parque Estadual do Sumidouro, em especial à Cintia Avelar, por disponibilizar o alojamento do parque.

Ao Tonho pelas sempre valorosos discussões sobre o carste e também aos demais moradores atuais, ou não, de casa; João, Atila, Dispa e Anderson, por compreenderem minha agenda não muito ortodoxa, além de cooperar com minha mania de limpeza.

Finalmente destaco aqueles sem os quais, esta pesquisa simplismente não seria possível seja por me fornecer alojamento, suporte logístico ou mesmo técnico. Os amigos, Peba e Warley, além de todos os funcionários da fazenda Cauaia, cujo o seu proprietário, sr Zé Hein, sempre disponibilizou apoio à todo tipo de pesquisa e, sem dúvidas, se apresenta como um defensor da ciência, pesquisa e meio ambiente. A minha “mãe mineira”, dona Leticia, por praticamente tudo! O sr João Bárbara, pelas ferramentas, “Paleokombão II” e sua incessante vontade de colaborar, mesmo já tendo feito isso pela ciência por mais de 55 anos. E por fim ao camarada de longa data André Strauss, por ter se disposto a ser “meu arqueólogo” e tudo mais possível.

No que tange as instituições destaco à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e à FFLCH e seus funcionários.

RESUMO

Na Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, no distrito da Lapinha, Município de Lagoa Santa, se localiza a Bacia Poligonal da Vargem da Lapa. Esse sistema, que não apresenta qualquer drenagem perene, tem na sua posição mais deprimida duas cavernas, a Vargem da Lapa e do Lapa do Beijo, que são o destino final de todo material transportado por suas vertentes.

Os pisos de ambas as cavernas estão totalmente colmatados por depósitos sedimentares, contrariando o observado no Carste de Lagoa Santa, onde a tendência é a remoção destes materiais e exposição dos condutos.

Para a melhor compreensão do comportamento dos materiais e características do recorte estudado, bem como completando estudos já realizados no carste, foram adotadas três linhas de pesquisa (i) análise das propriedades físicas e químicas da cobertura pedológica da bacia e dos depósitos clásticos do interior das cavernas, (ii) caracterização morfológica dos três compartimentos do carste local – exocarste, epicarste e endocarste e (iii) emprego de novos dispositivos para a caracterização espacial destes compartimentos.

Os resultados das análises física e química do material móvel da paisagem, apontou a presença de cambissolos nas áreas de cimeira e vertente, enquanto nas zonas de topografia mais branda, ocorre a presença dos latossolos além disso, foi atestada a hipótese de que a cobertura pedológica da região não é fruto da pedogênese das rochas carbonáticas. Já no material do interior da caverna foram identificadas argilas de alta atividade, insinuando uma rigorosa seleção granulométrica durante seu transporte

A morfologia da paisagem chamou atenção pelo discreto desenvolvimento de seus elementos, se comparados à outras posições do Carste de Lagoa Santa. No exocarste só foi anotada ocorrência de uma dolina, enquanto as feições do epicarste não chamam a atenção como no Planalto das Dolinas. Já o endocarste expõe corredores estreitos e ausência de salões amplos e ornamentados.

O imageamento da bacia para posterior geoprocessamento foi realizado com o auxílio de um *Remotely Piloted Aircraft (RPA)* e trouxe ao estudo um produto gráfico muito proveitoso pois permitiu alcançar elementos não visíveis em softwares de visualização do terreno. Já no levantamento topográfico da caverna foram utilizados dispositivos novos na sua mensuração, reduzindo consideravelmente o tempo desta tarefa.

O concatenamento das conclusões desses três eixos permitiu inferir que as áreas de influência das cavernas são variáveis e deve ser considerado a condição que elas se posicionam em relação à bacia. Além disso os resultados obtidos, abriram portas para futuras averiguações mais complexas no ambiente.

ABSTRACT

In the Environmental Protection Area of Lagoa Santa, in the district of Lapinha, Municipality of Lagoa Santa, the Poligonal Basin of Vargem da Lapa is located. This system, which does not have any perennial drainage, has in its most depressed position two caves, Vargem da Lapa and Lapa do Beijo, which are the final destination of all material transported by its slopes.

The floors of both caves are completely covered by sedimentary deposits, contrary to what is observed in the Carte de Lagoa Santa, where the tendency is the removal of these materials and exposure of the conduits.

In order to better understand the behaviour of the materials and characteristics of the studied clipping, as well as completing studies already carried out on the karst, three lines of research were adopted: (i) analysis of the physical and chemical properties of the pedological cover of the basin and the clastic deposits of the interior of the (ii) morphological characterization of the three local karst compartments - exocarste, epicarste and endocarste and (iii) use of new devices for the spatial characterization of these compartments.

The results of the physical and chemical analysis of the mobile material of the landscape, pointed to the presence of cambisols in the summit and slope areas, while in the areas with a milder topography, the presence of the oxisols also occurred, it was attested to the hypothesis that the pedological cover of the region is not the result of the pedogenesis of the carbonate rocks. In the material of the interior of the cave, high activity clays were identified, insinuating a rigorous granulometric selection during its transportation

The morphology of the landscape attracted attention due to the discrete development of its elements, if compared to the other positions of the Carte de Lagoa Santa. In the exocarste was only noted occurrence of a dolina, while the features of the epicarste do not attract attention as in the Sinkhole Plateau. The endocarste exposes narrow corridors and the absence of large, ornate halls.

The imaging of the basin for subsequent geoprocessing was accomplished with the aid of a Remotely Piloted Aircraft (RPA) and brought to the study a very useful graphic product because it allowed to reach elements not visible in software of visualization of the terrain. Already in the topographic survey of the cave were used new devices in its measurement, considerably reducing the time of this task.

The concatenation of the results of these three axes allowed inferring that the areas of influence of the caves are variable and must be considered the condition that they are positioned in relation to the basin. In addition the results obtained, opened doors for future more complex enquiries.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo esquemático do processo de dolinamento por colapso..... 9

Figura 2: Representação esquemática (em perfil A-E e em planta A'-E') do processo de coalescência das dolinas, resultando em uma uvala 10

Figura 3: Sequencia evolutiva de depressões poligonais a partir da drenagem fluvial, onde "A" é a fase inicial de entalhe e início da exposição dos calcários. Drenagem superficial ativa e lençol freático raso e "D" a ampliação dos divisores entre os sumidouros e estabelecimento de bacias poligonais,..... 13

Figura 4: Mapa do Estado de Minas Gerais, com a localização da APA Carste de Lagoa Santa. 27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos solos gerados nos dois principais grupos calcários estudados por Ciric (1967) 15

Tabela 2: Tipos de Sedimentos 19

Tabela 3: Classificação dos sedimentos clásticos de cavernas 22

Tabela 4: Geologia da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa 31

Tabela 5: Distribuição da população do município de Lagoa Santa 36

Tabela 6: Distribuição do PIB de Lagoa Santa por setor 36

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Distribuição de tradagens e perfis 45

Foto 2: Perfil 1 46

Foto 3: Perfil 2 46

Foto 4: Perfil 3 46

Foto 5: Trincheira aberta na Lapa do Beijo 46

Foto 6: Caixa com testemunhos de sondagem 54

Foto 7: Detalhe de um dos testemunhos de sondagem 54

Foto 8: Detalhe da vertente e sua declividade pouco acentuada 74

Foto 9: Lapiás e kamenitza observados no topo do maciço da área de estudo75

Foto 10: : Rain Pits observados em rocha aflorante na entrada da Vargem da Lapa 75

Foto 11: Material clástico consolidado no teto da caverna Vargem da Lapa ... 76

Foto 12: Fosseis de fauna (paca) no teto da Vargem da Lapa..... 76

Foto 13: Piso da caverna totalmente colmatado por sedimentos, situação que ocorre em todo seu desenvolvimento e paredes com scallops de varios tamanhos, indicando diversas fases do fluxo d'água. 76

Foto 14: Imagem do maciço rochoso feita com RPA 78

Foto 15: Imagem disponível no Google Earth 78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Frações areia, silte e argila (%) no Perfil 1 55

Gráfico 2: Frações areia total, silte e argila (%) no Perfil 2 56

Gráfico 3: Frações areia total, silte e argila (%) no Perfil 3 57

Gráfico 4: Frações areia total, silte e argila (%) na greta de superfície 58

Gráfico 5: Frações areia total, silte e argila (%) no Horizonte 1 59

Gráfico 6: Frações areia total, silte e argila (%) no Horizonte 2 60

Gráfico 7: Frações areia total, silte e argila (%) no Horizonte 3 61

Gráfico 8: pH em H_2O..... 62

Gráfico 9: Teor de Matéria Orgânica 63

Gráfico 10: Teor de Cálcio (mmolc.kg$^{\cdot 1}$) 64

Gráfico 11: Teor de Magnésio (mmolc.kg•1) 65

Gráfico 12: Teor de Alumínio (mmolc.kg•1)..... 66

Gráfico 13: Soma das Bases (mmolc.kg•1)..... 67

Gráfico 14: Capacidade de Troca de Cátions (mmolc.kg$^{\cdot 1}$) 68

Gráfico 15: Saturação em Base (%)..... 69

Gráfico 16: Porcentagem de Saturação em Alumínio (%)..... 70

Sumário

1 INTRODUÇÃO. 1

2 REFERENCIAL TEÓRICO E METODOLÓGICO. 3

2.1 A Carstologia 3

2.2 A morfologia Cárstica 7

2.2.1 Exocarste 7

2.2.2 Epicarste 13

2.2.3 Endocarste 16

2.3 A Carstologia em Lagoa Santa 17

2.4 Depósitos Clásticos. 18

2.4.1 Classificação dos Sedimento Clásticos 21

2.5 Solos em Terrenos Cárticos 22

2.6 Impactos humanos em terrenos cársticos 23

2.6.1 Perda de solo em Sistemas Cársticos 24

3 UNIVERSO DE ANÁLISE 26

3.1 Localização 26

3.2 Clima 28

3.2.1 Temperatura 28

3.2.2 Índices Pluviométricos 29

3.3 Contexto geológico 30

3.3.1 Membro Pedro Leopoldo 31

3.3.2 Membro Lagoa Santa 32

3.3.3 Formação Serra de Santa Helena 32
3.4 Vegetação 32
3.5 Histórico da ocupação humana 34
3.6 Geomorfologia 37
3.7 Solos de Lagoa Santa 40
4 METODOLOGIA 43
4.1 Eleição da área de estudo 43
4.2 Atividades de Campo 43
4.2.1 Levantamento Pedológico 44
4.2.2 Utilização de Remotely Piloted Aircraf (RPA) 47
4.2.3 Topografia espeleológica 48
4.2.4 Materiais utilizados no levantamento 49
4.3 Atividades de Laboratório 49
4.3.1 Análises químicas 49
4.3.2 Análises Físicas 50
4.4 Atividades de Gabinete 51
4.4.1 Cartografia Espeleológica 51
4.4.2 Processamento de RPA 52
4.4.3 Delimitação da Bacia 52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 53
5.1 Análise dos solos e depósitos 53
5.1.1 Análise Textural dos Perfis 54
5.1.2 Desenvolvimento Textural dos Horizontes 58

5.1.3 Análises Químicas 61

5.1.4 Classificação do Solos da Bacia 70

5.2 Geomorfologia da bacia poligonal da Vargem da Lapa 72

5.2.1 Exocarste 72

5.2.2 Epicarste 74

5.2.3 Endocarste 75

5.3 Remotely Piloted Aircraf 77

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 79

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

8 ANEXOS: 96

1 INTRODUÇÃO.

Inserido no complexo campo da perda de solos os longo das vertentes, este estudo busca explorar dada temática em um ambiente onde a mesma se revela pouco abordada, o carste, mediante uma ótica temporal centrada na escala de tempo das ações antrópicas, uma vez que estas passam a assumir um papel de destaque no acionamento e intensificação dos processos movimentação dos materiais clásticos.

A área elegida para este estudo foi a Bacia Poligonal da Vargem da Lapa, que se posiciona como um recorte dentro de um importante cenário das Ciências da Terra brasileira, o Carste de Lagoa Santa na região central de Minas Gerais, onde ainda no século XIX, o naturalista dinamarquês Peter Willian Lund teve seu interesse despertado pelas características do meio físico da região, o Carste se apresenta como um dos principais palcos de pesquisas arqueológicas, paleontológicas, espeleológicas e carstológicas do Brasil.

A presença humana no Carste de Lagoa Santa, remonta há aproximadamente 12000 anos sempre tendo uma relação estreita com o impacto no ambiente cárstico. Muito comum neste período, era a alteração das entradas das cavernas, seja por meio do vistoso acervo rupestre deixado em seus paredões calcários ou pela surpreendente acumulação de vários metros de sedimento de origem antrópica.

Como uma das maiores dificuldades da tentativa da mensuração do impacto humano frente à qualquer sistema natural, é a dificuldade na distinção das mudanças naturais, daquelas que são resultados da intervenção antropogênica, tende a se tornar ainda mais imprecisa a constatação de impactos acionados pelo homem, em uma escala de tempo que contemplaria praticamente todo período holocênico.

Nas duas oportunidades que a região de Lagoa Santa foi submetida a classificações pedológicas (CPRM, 1994, Shizato, 1998) a Bacia Poligonal da Vargem da Lapa foi caracterizada apenas como “área urbana” não tendo sua

cobertura móvel devidamente caracterizada, sendo esta uma oportunidade adequada para sua realização.

Desta maneira, como é sabido que as grandes mudanças no meio físico do carste se deram após a chegada dos colonizadores brancos, em especial após a implantação das mineradoras de calcário na década de 50, o cerne desta pesquisa desenrola-se nos impactos que estejam ocorrendo subsequentemente a dado período.

O âmago desta pesquisa é desenvolver um estudo sobre as inter-relação dos elementos geomorfológicos e pedológicos entre as três esferas - exocarste, epicarste e endocarste, desta peculiar paisagem na Bacia Poligonal Vargem da Lapa, e identificar quais as forçantes antrópicas que possam estar influenciando a suscetibilidade do relevo em uma eventual alteração no equilíbrio dinâmico de dado ambiente.

São objetivos específicos deste estudo.

- Elaborar uma caracterização espacial que busque contemplar informações sobre formas, processos, materiais e suscetibilidades existentes da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa.
- Estabelecer uma classificação para cobertura pedológica da bacia.
- Esclarecer de maneira ainda mais adequada a extensão das áreas de influências direta e indireta das cavernas, baseado na caracterização do uso do solo e suas implicações nos processos de erosão/deposição da área de estudo.
- Antecipar possíveis passivos ambientais que estejam ocorrendo nas cercanias das cavidades, os quais encontram nelas, um dos primeiros locais de reverberação.
- Aplicação de novas técnicas para avaliação e caracterização dos processos ativos no ambiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E METODOLÓGICO.

2.1 A CarstologiaA palavra karst é a forma germânica do termo “Krs”, a qual remete a “terreno rochoso”, principal característica da região específica do nordeste da Itália e noroeste da Eslovênia (Sweeting, 1983), sendo referida na literatura como o *carste clássico*, uma vez que nela, se basearam os primeiros estudos sobre o tema na segunda metade do século XIX.

Gams (1973) sumariza que os primeiros trabalhos onde o termo *karst* é usado, inicialmente diziam respeito a região e em um momento posterior, ainda como um termo abrangente ao tipo do modelado. Fatores como a proximidade com a área, fizeram com que a escola geológica e geomorfológica de Viena viesse a ter significativa influência na produção acadêmica sobre o carste, sendo relevante o apontamento do nome de pesquisadores como Albert Penk, menção elementar da escola geomorfológica alemã.

Nos Estados Unidos trabalhos empreendidos por geólogos na segunda metade do século XIX, sobre os carstes de Indiana por Owen (1856 apud ROGLIC, 1972) e posteriormente no Kentucky por Cox (1874 apud ROGLIC, 1972), são considerados os primeiros realizados no país.

Também se faz de extrema importância a campanha realizada no ano de 1899 em conjunto pela dupla Willian Morris Davis e Albert Penck no carste da Bósnia Herzegovina (GAMS, 1973). Tal campanha pode ser considerada um marco para os pesquisadores de Viena, uma vez que propiciou discussões entre as duas escolas da nascente ciência geomorfológica, e também dos ciclos de desenvolvimento do modelado cárstico. Posteriormente, mediante significativa influência do modelo de “Ciclo Geográfico”, Grund (1914) e Cvijic (1918 apud SANDERS, 1921) sugerem e difundem os primeiros modelos evolutivos da paisagem cárstica.

Fortemente influenciado pela escola Davisiana, o modelo proposto por Grund, distingue quatro fases evolutivas no carste, sendo elas o carste jovem representado por dolinas isoladas locadas em grandes áreas planálticas; carste adolescente, no qual as dolinas passam a sofrer alargamento, além de mais

numerosas, uma vez que é nesta fase que as dolinas são submetidas à processos de colapso. O carste maduro diz respeito ao momento do desaparecimento da superfície original em função do desenvolvimento das largas dolinas e uvalas, além da individualização de morros residuais. Finalmente o carste senil é constituído por um terreno plano com os edifícios rochosos individualizados na paisagem.

No modelo apresentado por Cvijic é possível notar semelhanças com o de Grund no estágio de maturidade, em contrapartida o autor despeja maior atenção os estágios preliminares em especial no tocante as transformações de vales fluviais em depressões fechadas. No estágio final, os vales reassumem seu padrão normal, de entalhe em litologia impermeável, restando como única característica do carste, os edifícios calcários residuais. É importante ressaltar que até o momento, dado trabalho tem sido considerado a principal referência histórica dentro do campo da geomorfologia cárstica.

É importante salientar que é desta época que surge a noção de que o carste se apresenta como um relevo característico de áreas fundamentadas sobre rochas solúveis, sendo a água rica em ácidos seu principal agente modelador. O termo carstificação, é apresentado pela primeira vez por Cvijic (1893), no intuito de diferenciar os processos de formação entre o ambiente cárstico daqueles comandados pela erosão fluvial.

Sobre a perspectiva morfológica, inicialmente as dolinas dominaram a atenção dos pesquisadores em especial Cvijic (op. cit.). Entretanto Grund (op. cit.) passa a dar destaque sobre o assunto da água subterrânea nos terrenos cársticos. Para o autor, as águas se encontravam conectadas em meio subterrâneo, sendo controladas originalmente pelo nível do mar, dando espaço para a discussão dos níveis de base hidrológico nos sistemas cársticos.

Fundamento em sua proposta do ciclo geográfico Willian Morris Davis (1930) elabora propostas sobre a origem das cavernas calcárias dentro de sua perspectiva cíclica. Posteriormente, os primeiros trabalhos sobre a dinâmica da água subterrânea são elaborados por Lehmann (1936), nas juntas e fraturas da rocha, buscando associa-las com a morfologia do relevo superficial. Foi este

autor que, ao observar o carste tropical de Java, elucubrou a clara importância do clima na evolução do carste

Piló (1998) afirma que nas últimas décadas, as pesquisas sobre o carste são ramificadas em dois eixos, especialmente quando se trata dos trabalhos de língua inglesa, sendo o primeiro desenvolvido por geógrafos físicos e geólogos, no qual autores como Sweeting (1983), Jennings (1985) e Gillieson (1996), buscam uma melhor compreensão da geomorfologia do carste.

Ainda segundo o autor, o outro eixo tem sua condução praticada principalmente por geólogos, hidrogeólogos, físicos e geoquímicos, mostrando que autores como Williams (1971), Pricknett et al. (1976) Dreybrodt (1990), Ford & Williams (1989), Auler (1994, 1999), trouxeram um grande avanço no tratamento quantitativo, relativo à geoquímica do carste, à hidrogeologia, estudos morfométricos e à espeleogênese. Em dado contexto, a análise quantitativa é predominante e seus temas sofre um elevado grau de detalhamento. Mesmo assim, é apontado que este eixo, tem prestado importantes contribuições para a geomorfologia, conforme observado em trabalhos como White (1984, 1988) Palmer (1984, 1991) e Williams (1985).

Piló (op. cit.) também apresenta os trabalhos produzidos na língua francesa sobre o carste, a qual se inicia no final do século XIX, através dos estudos de Martel sobre o meio subterrâneo e, posteriormente, através do emprego do modelo cíclico anteriormente proposto por Cvijic (Renault, 1992). As concepções de Martel foram difundidas através da obra de Martonne (1909), permanecendo dominantes até a década de 50.

As obras de Tricart & Cailleux (1955) e Tricart (1965) marcam significativamente a geomorfologia francesa, bem como o trabalho de Corbel (1965). É neste período, são feitas as principais críticas à Davis, trazendo também a valorização dos elementos climáticos na dinâmica evolutiva do relevo. A cartografia geomorfológica também recebe grande atenção por parte da escola francesa, em especial por Tricart.

Bakalowicz (1992) pontua que os trabalhos de Corbel, seguido de Nicod (1972), centraram seus esforços no estudo do clima como papel essencial no controle do processo de carstificação, influenciando toda geomorfologia cárstica francesa.

O idioma sempre foi um empecilho ao acesso acerca dos trabalhos sobre o carste na Alemanha, entretanto é possível destacar o trabalho de Bögli iniciada na década de 50, sendo sumarizada em 1980. Em Hidrologia Cárstica e Espeleologia Física, o autor busca teorizar diversos temas tocantes ao carste como, geoquímica, bem como trouxe a integração da hidrogeologia com a espeleologia física. Seu material é dotado de um forte embasamento descritivo da morfologia cárstica, se tornando um importante guia para a descrição das singularidades do modelado, para pesquisadores brasileiros como Kohler e Karmann.

Tricart (1956) pode ser considerado o primeiro autor a, efetivamente, pesquisar o carste no Brasil, caracterizando sua pesquisa em análises descritivas do modelado de Lagoa Santa, região essa também explorada por outros autores como Coutard et al. (1978), Kohler et al. (1978) e Kohler (1989).

Diante desta perspectiva, outros territórios cársticos, em especial no Estado de Minas Gerais, também vem sendo observado como é o caso da Mata de Pains por Barbosa (1961), a região de Santana do Riacho por Auler & Basílio (1988) e Piló (1989) referente a geomorfologia do Vale do Peruaçu. Demais Estados também foram palco de estudos como Ferrari (1990) e Cruz Junior (1998), caracterizando as feições da região de Iraquara na Bahia, e embora que dentro de um cenário montado sobre a pesquisa arqueológica, Rodet (1997) ao avaliar o carste de São Raimundo Nonato no Piauí.

Em síntese, tais trabalhos tem contribuído para a construção de um arcabouço de análises sobre o carste fortemente baseadas na geomorfologia, trazendo à pesquisa da morfologia cárstica, diversas tipologias distintas.

Tomando como base os estudos desenvolvidos por hidrogeólogos e geólogos de língua inglesa, a pesquisa de linhas mais específicas, começaram

a se diversificar nos anos 90’ s. Estudos focados em hidroquímica e hidrologia no carste de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG, produzidos por Auler (1994) e Karmann (1994), abordando questões semelhantes no carste da região do Alto Ribeira, SP.

Outra esfera que passa a apresentar diversas pesquisas, são os estudos relacionados ao quaternário. Dentro deste quadro, os trabalhos de Coutard et al. (1978), Kohler (1989), Parizzi (1994), Karmann (1994) e Malta (1995), os quais com base em registros recentes como morfológico e palinológicos, propuseram interpretações acerca das mudanças ambientais sofridas pela ambiente cárstico durante o quaternário

Ainda no âmbito das pesquisas quaternárias, merecem destaque os estudos com enfoque nos depósitos sedimentares do interior das cavernas, onde as pesquisas desenvolvidas por Laureano (1998, 2014) na região de Iraquara, BA, procuram melhor compreender o desenvolvimento da paisagem cárstica, baseado no material clástico encontrado no interior das cavidades.

Finalmente, é relevante apontar para os estudos com enfoque na questão ambiental, onde passa a se pontuar as alterações que estejam ocorrendo nas cavernas, seja o que esteja ocorrendo diretamente nela, ou que possa estar ecoando na mesma. Neste bloco, é possível referir autores como Brandt (1988). Silva et al. (1987; 1988), Pessoa (1996), Pereira (1998) e Moura et al. (2013).

2.2 A morfologia Cárstica

Bögli (1980) procura discernir a morfologia da paisagem cárstica em três setores distintos, sendo eles o exocarste, o epicarste e o endocarste, os quais serão retratados individualmente adiante

2.2.1 Exocarste

Diz respeito ao exocarste, o conjunto morfológico da superfície da paisagem cárstica. Para Bögli (1980), tal agrupamento pode adquirir uma enorme gama de tipologias dada as diversas variáveis que se ajustam para

configurar o modelado. Dentre suas principais formas típicas, é possível destacar as dolinas, poljes, lapiás (karrens) e vales cegos.

Também se faz interessante apontar a variedade de escalas dentro das formas típicas do carste, onde é possível observar desde as formas centimétricas dos lapiás, até as proporções da ordem de quilômetros quadrados, quando tratada magnitude de um vale cego.

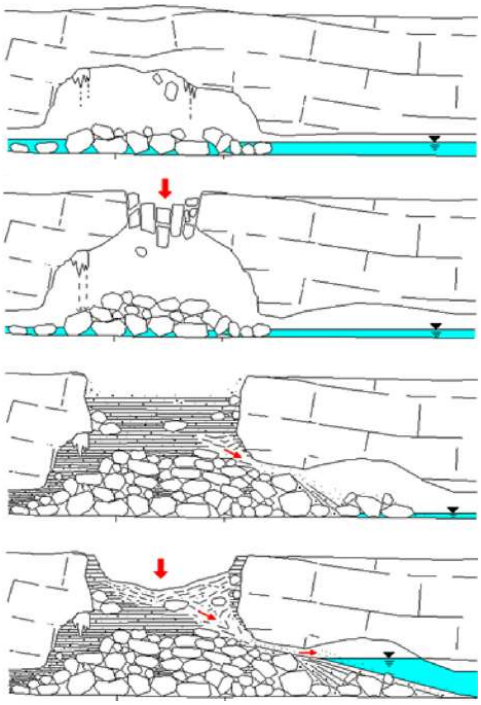
Embora não estejam resumidas apenas ao terreno cárstico, as dolinas podem ser consideradas a forma mais particular do exocarste. Cvijic (1893) foi o primeiro autor a cunhar o termo, ao designar as depressões fechadas em formato elíptico ou circular, presentes na superfície, resultado da dissolução das rochas em subsuperfície. Tal forma, pode atingir de poucos metros até centenas de metros de profundidade, por várias centenas de metros de diâmetro.

A classificação proposta por Jennings (1985) pode ser considerado a mais adequada em termos morfogenéticos, sendo elas; as dolinas de dissolução, dolinas de colapso ou abatimento, colapso devido ao carste subjacente e as dolinas aluviais ou de subsidência.

As dolinas de dissolução surgem quando por imperfeições de ordem estrutural da rocha (fraturas, juntas, planos de acamamento), fazendo com que esta sofra maior dissolução em pontos mais suscetíveis, gerando pequenas depressões. Prontamente, as águas superficiais passam a convergir para a área central de absorção, tornando-a um ponto de dissolução acelerado.

Dolinas de abatimento são o resultado da perda de sustentação da rocha, mediante a ampliação de vazios (condutos e salões de cavernas) em subsuperfície. Seu colapso, geralmente se dá de maneira abrupta (Figura 1)

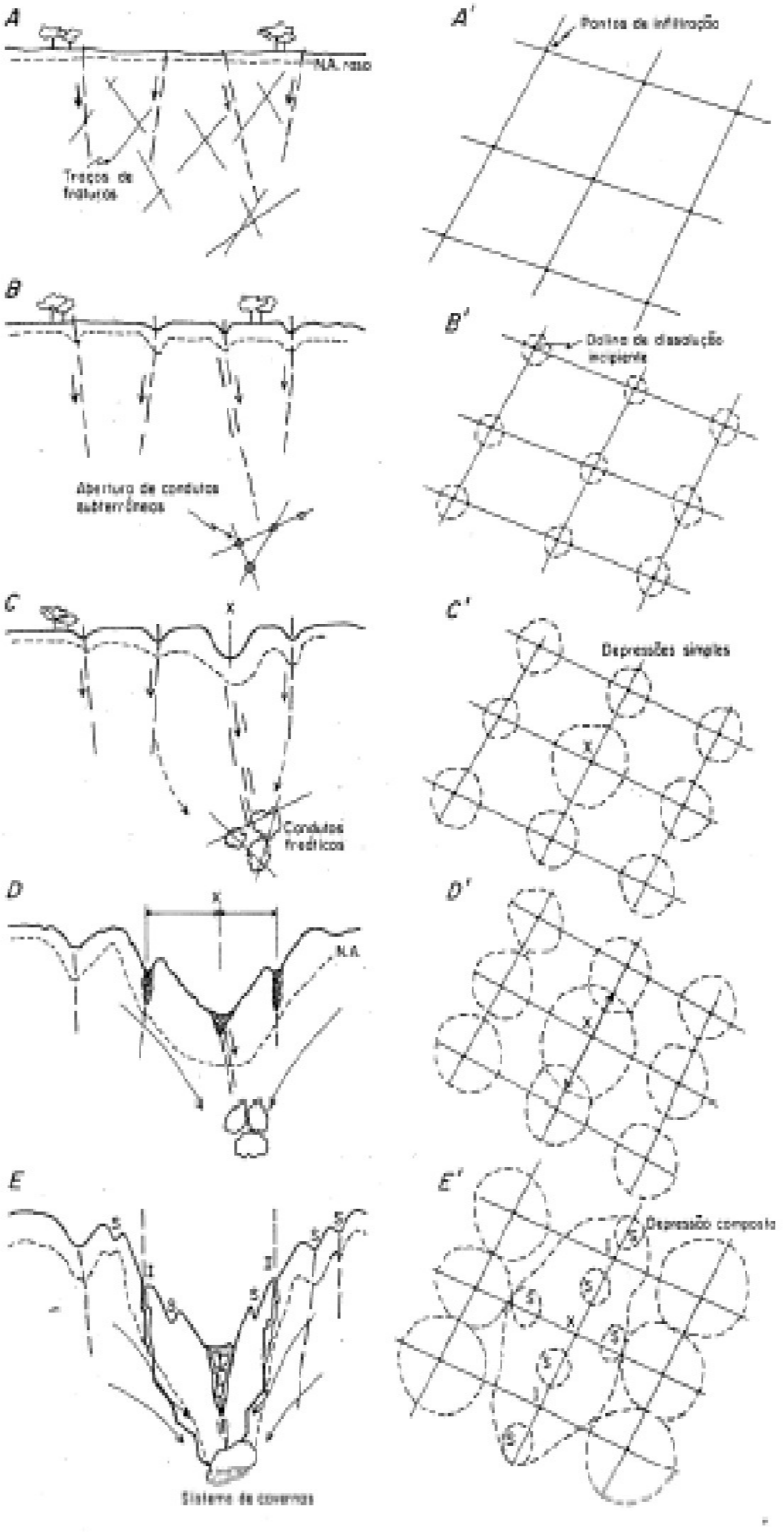
Figura 1: Exemplo esquemático do processo de dolinamento por colapso



As dolinas de subsidência ocorrem quando a cobertura de solo, passa a ser introduzida gradualmente nas fraturas da zona epicárstica, gerando pequenas subsidências na superfície da cobertura e consequentemente gerando a criação de dolinas

Quando ocorre a coalescência de duas ou mais dolinas, tem-se o surgimento das uvalas, ou dolinas compostas. De acordo com White (1988), tal forma é o resultado da evolução dinâmica do conjunto de depressões que com o tempo vão crescendo. Tal processo tende a se incrementar conforme se alargam as uvalas, uma vez que os desenvolvimento da área de captação das águas meteóricas, passa a aumentar a capacidade de carga da bacia, acentuando os processos hidrológicos nas três zonas do carste. (Figura 2)

Figura 2: Representação esquemática (em perfil A-E e em planta A'-E') do processo de coalescência das dolinas, resultando em uma uvala



Fonte: Karmann, 1994

Outra forma característica da geomorfologia cárstica, são os poljes. Tal feição geomorfológica, já foi descrita nesse volume anteriormente, de acordo com a classificação de Gams (1978, Apud PILÓ, 1998).

Formas residuais do calcário podem apresentar pequenas marcas, furos, sulcos, ou saliências de dimensões entre a ordem centimétrica, até poucos metros. Dentro da terminologia alemã, essas formas recebem o nome de karrens, enquanto da terminação francesa, mais utilizada no Brasil, recebe o nome de lapiés ou lapiás.

Posteriormente, Bögli (1960) sugere um modelo de classificação dessas feições de acordo com a gênese das mesmas. No caso, o autor propõe a divisão das feições em dois grandes grupos, sendo eles o dos *karrens* formados diretamente sobre a rocha e os *karrens* desenvolvidos em carste parcialmente coberto. Outros autores como Jennings (1985) e Ford & Williams (1989) complementaram a classificação de Bögli

Ambientes cársticos de transição que detenham características geomorfológicas de paisagens fluviais e cársticas, recebem a alcunha de fluviocárstica, conforme descrito e caracterizada por Piló (1998). Para o autor, tal feição se esculpe em vales cegos submetidos à interrupção abrupta de sua drenagem superficial mediante a presença de um sumidouro. Após seu curso subterrâneo, tal drenagem pode ressurgir na base de escarpamentos e novamente drenar a superfície, em um ambiente com características de um vale normal, aqui denominados de vales recuados.

Embora no meio das geociências, os lapiás e principalmente as dolinas sejam sinônimos de geomorfologia do exocarste, elas não são de exclusividade das paisagens cársticas, podendo vir a ocorrer em diversas, e mais raras, condições. Entretanto, o carste detém uma feição de relevo situada exclusivamente nele, as bacias poligonais centrípetas, ou vales cegos.

A contrário dos vales fluviais usuais, os vales cegos do carste tem como, final, um ponto, o sumidouro, para onde todo seu sistema hidrológico converge, não sendo tributário, ao menos em superfície, de um rio de ordem superior. Na

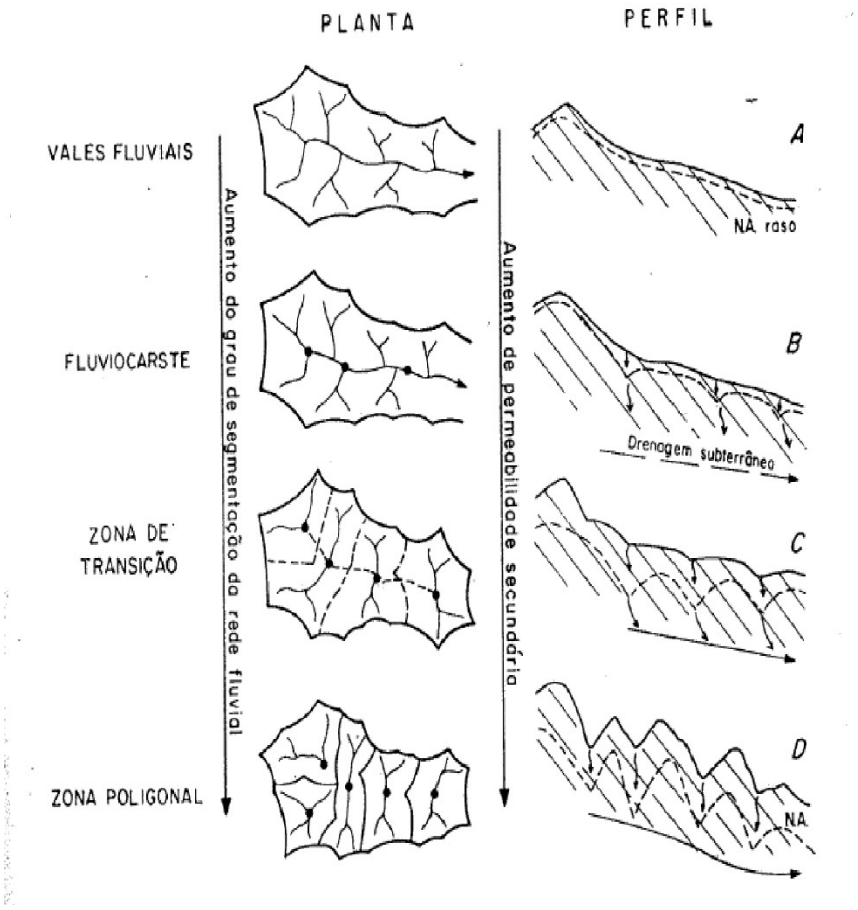
área do sumidouro pode haver, ou não, a inundação temporária do local em condições climáticas propícias.

Uma fase fluvial anterior ao entalhe do modelado cárstico, vem sendo refletida desde estudos de Penck (1900), Lehmann (1936) e Roglic (1960). Baseados sobre este conceito, Gunn (1978 e 1981) e Miller (1982), apud Ford & Williams (1989) evidenciaram o processo de transformação da paisagem fluvial para as de bacias poligonais centrípetas, através da possibilidade da reconstrução da paleodrenagem superficial sobre carstes de Porto Rico, Nova Zelândia e Belize. Para Karmann (1994) tal transfiguração da paisagem, ocorreria em consequência do aumento gradativo da capacidade de drenagem subterrânea em rochas carbonáticas e a evolução de dolinas de dissolução, com respectivas bacias poligonais, sobre os canais e vales fluviais (Figura 3).

Depressões poligonais também são frequentes no fluviocarste, figurando como antigos vales fluviais, cuja drenagem fora capturada para o meio subterrâneo, resultado do rebaixamento dos níveis freáticos.

Talvez o principal exemplo do fluviocarste no Brasil, seja o vale do Peruaçu, norte de Minas Gerais. Esse sistema representa um trecho do rio Peruaçu, que se desenvolve ao longo de um *canyon* cárstico de abatimento com 17km de extensão por 50-100 metros de largura, apresentando em seu trajeto diversos sumidouros e ressurgências (vales cegos e recuados) caracterizando segmentos de condutos subterrâneos remanescentes do sistema endocárstico inicial. (PILÓ, 1989)

Figura 3: Sequencia evolutiva de depressões poligonais a partir da drenagem fluvial, onde “A” é a fase inicial de entalhe e início da exposição dos calcários. Drenagem superficial ativa e lençol freático raso e “D” a ampliação dos divisores entre os sumidouros e estabelecimento de bacias poligonais,



Fonte: Karmann, 1994

Os remanescentes dos processos de dissolução diferencial sofrido pela rocha, são os paredões, torres, cones de blocos e maciços rochosos. Embora não exclusivas, as formas do tipo torres e cones, são comuns das paisagens cársticas tropicais, recebendo nominações específicas de acordo com a região estudada, como as cones e torres elevadas da China, sigmoides em Borneo e os paredões, ou maciços rochosos no Brasil

2.2.2 Epicarste

Constituída como a zona de contato entre o material móvel e a rocha, o epicarste, ou zona subcutânea apresenta uma rede de fissuras alargadas pelas

atividades modeladoras cársticas (WILLIANS, 1985; FORD & WILLIAMS, 1989; PALMER; 1991, PILÓ. 1998)

Dentro desta conjuntura, o regolito e os solos, revelam importante atribuição na avaliação da zona epicárstica, posto que o material móvel se posiciona imediatamente acima da rocha, regendo a movimentação de soluções e do desenvolvimento da morfologia rochosa coberta.

Após analisar solos calcários na Suíça, Bulgária, Alemanha, Paquistão e na então Iugoslávia, Ciric (1967) apresentou a direta dependência entre o tipo de solo e o modo de alteração da rocha sobre o qual estaria assentado, estipulando um esquema que relaciona o tipo de solo observado com o calcário sobre o qual o mesmo está assentado (Tabela 1). Em suas observações, o autor aponta que calcários dolomitizados com 30 a 40% de resíduos, apresentam o desenvolvimento de solos minerais com carbonatos bem representados e perfis com significativo desenvolvimento vertical. A situação antagônica, onde observados solos sobre calcários com quantidades superiores a 90% de carbonato de cálcio, a parte mineral é oriunda da decomposição química da rocha, originando um resíduo não solúvel. Estes solos apresentam lento desenvolvimento de seus perfis, geralmente rasos.

Analisando solos assentados sobre rocha calcária em meio mediterrâneo, Verheye (1989) elencou três fazes evolutivas no processo de evolução dos solos: fase litomorfa, responsável pela formação da pequena camada de alteração no contato com a rocha; fase bruna, quando ocorre o desenvolvimento dos solos parcialmente descarbonatados; e a fase vermelha, quando passa a ser possível a observação do espessamento da descarbonatação, rubeficação e a formação de solos descarbonatados e parcialmente descalcificados em posição de paisagem estável.

Tabela 1: Características dos solos gerados nos dois principais grupos calcários estudados por Ciric (1967)

	Calcário margoso e dolomitizado	Calcário puro
Características do intemperismo	Intensa desintegração mecânica procede a decomposição química	Decomposição química
Manto de alteração	Carbonato margoso produzido pela desintegração mecânica	Resíduo insolúvel
Fase primaria de desenvolvimento	Bem expressiva com minerais carbonáticos	Bem expressiva com solos orgânicos sem carbonato
Intensidade de transformação	Rápido e intenso	Muito lento
Espessura no primeiros estágios	Moderadamente profundo a profundo	Raso
Desenvolvimento de processos cársticos	Restrito	Bem desenvolvido

Fonte: Piló (1998)

Piló (1998) sumariza diversos trabalhos sobre a formação de solos sobre rocha calcária como por exemplo no carste tropical chinês de Guangxi, onde Yuan (1991) calculou que seriam necessários de 250.000 a 850.000 anos para gerar 1m de solo. Thévenin (1963) afirma que para se gerar 1m³ de argilas descalcificadas, são necessários 80m³ de rocha calcária. Ensaios desenvolvidos em laboratório sobre a alteração dos carbonatos por Lamourox (1972) aferiu que para a formação de 30cm de solo, seriam necessários 5m de rocha dura contendo 2,2% de resíduo, cobrando de 50.000 a 100.000 anos para a formação de um perfil de solo. Piló (op. cit.) salienta que a quantidade de resíduo e a

condição climática, são de papel fundamental na questão do tempo de formação de solos sobre calcários.

2.2.3 Endocarste

O endocarste, ou carste subterrâneo, diz respeito ao termo utilizado por diversos autores para designar a área do carste onde se encontram os condutos em subsuperfície, ou seja, as cavernas.

Sendo as cavernas entalhadas através da dissolução da rocha carbonática pela ação da água, tem-se instaurado uma discussão sobre o regime hidrológico para a formação das mesmas. Hoje é sabido que o entalhe do endocarste se dá tanto em zona vadosa, como em zona freática.

A teoria do entalhe vadoso, diz respeito as cavernas formadas pela ação intensiva dos cursos d'água acima do nível freático, ou seja pela ação gravitacional. Em tal modelo, se parte do pressuposto que a água superficial infiltra no endocarste via sumidouros e com grande potencial de dissolução e a medida em que se atinge a zona saturada, a erosão tende a ocorrer de maneira menos agressiva, onde tende a ocorrer ao longo dos planos de acamamento e fraturas do calcário (FORD; WILLIAMS, 1989).

O modelo de entalhe de cavernas freáticas diz respeito àquelas formadas abaixo do nível freático, em ambientes em que todos os vazios se encontram saturados pela água. Em etapa inicial, um conjunto de condutos de pequeno diâmetro são desenvolvidos através de fluxo lento nas fraturas e juntas. Sequencialmente, alguns destes pequenos condutos passam a se desenvolver mais rápido que os demais. Uma vez atingido diâmetros entre 5 e 15mm, o fluxo hidrodinâmico deixa de apresentar caráter lento, se tornando turbulento, resultando no aumento significativo da dissolução da rocha.

No carste de Lagoa Santa, mais de 500 cavernas já foram catalogadas. De acordo com Auler (1999), em geral os condutos apresentam curtas seções de outrora grandes sistemas que foram expostas ou segmentadas pelo dolinamento, ou retração das vertentes. Em geral, os condutos se caracterizam

como passagens secas situadas na base de dolinas ou na base dos maciços calcários. Dentro da proposta de Palmer (1991), sobre a classificação dos padrões morfológicos das cavernas, observadas em planta baixa, geralmente, as cavernas apresentam padrão morfológico labiríntico, embora uma quantidade significativa seja observada como padrão em rede.

Tal qual a grande maioria das cavernas de área intracratônica brasileira os condutos as cavernas de Lagoa Santa apresentam sua base rochosa colmatada por sedimentos, os quais passam a agir como elemento modelador dos condutos, uma vez que protegem o piso calcário da erosão química da água. O resultado pode ser observado em seção transversal dos condutos, que passam a apresentar um formato triangular.

2.3 A Carstologia em Lagoa Santa

A primeira descrição geomorfológica da região de Lagoa Santa foi feita por Lanari em 1909, que já atentava para a natureza cárstica do terreno. Entretanto, foi só com o trabalho de Tricart (1956) oriundo da escola francesa de geomorfologia, que os primeiros modelos tocantes à origem, foram propostos. A presença esporádica de formas calcárias na região não permite classificá-la como caracteristicamente cárstica. Para ele, a presença dos altos paredões era decorrência de erosão diferenciada entre as rochas metamórfica encaixantes e as rochas carbonáticas. Para o autor, ainda que estas estivessem originalmente sobrepostas, processos geradores de falhas teriam as posicionado paralelamente em algumas regiões, gerando assim os escarpamentos com padrões retilíneos. Lester King (1956) publicou seu trabalho atribuindo aos seu Ciclo Denudacional do Rio das Velhas o relevo cárstico da região de Lagoa Santa (Piló, 1998).

Journaux (1977) atribui ao carste de Lagoa Santa um baixo grau de desenvolvimento devido à ausência de depressões alargadas com testemunhos residuais no centro. Para ele, os paredões seriam resultado do aprofundamento gradual de dolinas periféricas aos mesmo

No entanto Kohler et al, (1979) sumarizaram a primeira carta comentada sobre a geomorfologia da região, acompanhada de um texto descritivo da mesma, na primorosa *Chart du Kast*.

Bálazs (1984) apresenta ideia um modelo evolutivo antagônico ao proposto por Journaux (1977), segundo a qual o rebaixamento do terreno teria levado ao recobrimento dos morros remanescentes por sedimentos provenientes de lagos, rios e abatimentos de vertentes. Este é um dos poucos autores que posiciona o início do desenvolvimento do processo de carstificação da região de Lagoa Santa ainda na era Mesozoica. Segundo ele, o material denudado do carste foi submetido diversas vezes a processos de cobrimento e descobrimento, sendo que processo atual de exumação está ocorrendo desde o fim do terciário (Piló, 1998).

Os estudos desenvolvido nos últimos anos na região acompanham a tendência mundial na geomorfologia cárstica, onde conscientes da capacidade de preservação dos registros sedimentares nas cavernas e usando ferramentas de datação como o ^{230}Th, Auler et al, (2009) analisaram as sequencias de sedimentação clástica alternada com camadas de calcita em cavernas. Na oportunidade os autores lançaram mão dos registros sedimentares de cavernas da região com o objetivo de apresentar mudanças paleoambientais. Já Haddad-Martin et al., (2017) realizando a análise faciológica dos sedimentos quaternários da gruta do Cuvieri, puderam ter concepções acerca da evolução da paisagem à montante da caverna.

2.4 Depósitos Clásticos.

Os terrenos cársticos contam com uma relação muito estreita com o conceito de erosão, especialmente com no que diz respeito ao processo de dissolução da rocha carbonática por ações intempéricas. Nada obstante, suas principais feições geomorfológicas de superfície como dolinas, uvalas e vales cegos, tal como seus condutos subterrâneos, caracterizam-se como armadilhas naturais, com enorme capacidade de reter e conservar sedimentos autóctones bem como os alóctones (LAUREANO, 1998). De maneira geral, é possível

apontar que os depósitos de cavernas são constituídos por todos os sedimentos clásticos, químicos ou orgânicos associados a tal (Tabela 2)

Tabela 2: Tipos de Sedimentos

	Tipo	Depósito
Sedimento em Cavernas	Orgânico	Guano, fragmentos de vegetais, fragmentos animais
	Químico	Carbonatos, sulfatos, nitratos
	Clástico	Elúvio, Alúvio, Colúvio

Fonte: Laureano (1998)

A exuberância dos espeleotemas, certamente veio a favorecer os estudos sobre os elementos que os compõe, fazendo com que os pesquisadores chegassem à principal fonte de seus subsídios, os depósitos químicos. Arqueólogos, paleontólogos e biólogos sempre centraram seus esforços da pesquisa sobre os sedimentos orgânicos como seu principal objeto de análise.

Por sua vez os sedimentos clásticos abraçam todos os detritos carreados e depositados ao longo dos condutos cársticos. Desta forma, os clastos estão submetidos ao mesmo retrabalho de processos fluviais e gravitacionais pelos quais os sedimentos químicos e orgânicos estão sujeitos no interior das cavernas.

É notório que as cavernas são importantes vias de fluxo, tanto em condições freáticas, bem como vadosas, estando ou não ativas. Sendo assim, são ou foram, ambientes intimamente ligados ao processo de condução de material detrítico e em diversos casos, ambientes de deposição.

Apenas nas últimas décadas que as Ciências da Terra passaram a enxergar os depósitos clásticos como um importante instrumento para análises de processos cársticos e paleoambientais. William M. Davis (1930) expõe pela

primeira vez os sedimentos na análise da evolução do relevo cárstico. Municiado pelos registros dos depósitos fossilíferos retratados por Peter Wilhelm Lund na região de Lagoa Santa, Lester King (1956) buscou determinar a cronologia do papel do Ciclo de Denudação Velhas no desenvolvimento paisagístico da porção oriental do Brasil.

Entre as décadas de 50 e 60, foram priorizados os estudos petrográficos, buscando a caracterização geológica dos sedimentos envolvidos clásticos das cavernas tendo como principal trabalho Milske et. al. (1963). Porém as principais contribuições para o tema, foram apresentadas pelos trabalhos de Bull (1976, 1978, 1980, 1981) e Bull et. al.(1989)

Próximo ao término da década de 60, os sedimentos clásticos passam a ser estudados buscando esclarecer seu auxílio no processo de iniciação e desenvolvimento do aquífero cárstico, no caso, a espeleogênese. Essa atenção é observada doravante aos trabalhos de White & White (1968) e Renault (1968). Este último é o trabalho responsável pela apresentação do essencial modelo espeleogenético denominado paragênese, no qual o piso dos condutos e galerias são colmatados por sedimentos finos e impermeáveis impedindo a corrosão, forçando a dissolução da rocha carbonática na porção superior dos condutos e o desenvolvimento das galerias para a porção superior das mesmas. Ao modelo antagônico, onde o entalhamento não se depara com nenhum tipo de obstrução sedimentar, foi designado o termo singênese. A partir deste ponto, o debate teórico envolvendo a atuação da paragênese na transformação das cavernas vem avançando como Ford & Ewers (1978), Ford & Williams (1989), Lauristsen & Lauristsen (1995), todavia, a apreciação dos sedimentos clásticos envoltos neste processo foi de certa maneira, omitida.

Até o final da década de 90, os estudos o material Deposicional de cavernas se caracterizava pelo reconhecimento do quão crucial este tipo de depósito é no resgate da evolução dos sistemas cársticos, além de ser o peça fundamental na construção do registro paleoambietal do período quaternário. Com o estabelecimento de técnicas de datação radiométricas em capas calcíticas, em especial a série de desequilíbrio do Urânio, a palinologia e a

obtenção de curvas de variação no paleomagnetismo, autores como Schmidt (1982) Milske et.al. (1983), Shoreder & Ford (1983), Schmidt et. al. (1984), Maire & Quinif (1988), Sasowsky et. al. (1985), Springer et. al. (1997) Quinif e Maire (1998) e Laureano (1998) puderam proporcionar notáveis correlações estratigráficas.

É possível afirmar que o estado da arte da pesquisa em depósitos clásticos de cavernas estejam divididos em dois principais blocos dentro das geociências. Um tem se desenvolvido com a implementação de novos métodos de geocronologia, em especial de isótopos cosmogênicos de ^{10}Be e ^{26}Al capazes de oferecer uma maior extensão nos resultados das datações, dando grande suporte à estudos para a melhor compreensão da evolução do modelado (ANTONY; GRANGER, 2007, LAUREANO, 2014). Já o segundo busca interpretar as mudanças ambientais e climáticas conforme apontaram Panno et al. (2004) e Ellwood e Goose (2006).

2.4.1 Classificação dos Sedimento Clásticos

Os estudos apresentados por Ford (1975), White (1988) e Ford & Williams (1989), buscam classificar a proveniência dos sedimentos de cavernas como proveniente de uma fonte alóctone ou autóctone, porém devido ao enorme grau de retrabalhamento aos quais os sedimentos de caverna estão sujeitos, principalmente pela atuação fluvial, esta classificação tem sido deixada de lado.

Laureano (1998) procura distinguir os sedimentos clásticos componentes dos condutos cársticos, em função do processo de sedimentação pelo qual os fragmentos foram depositados nas galerias, reconhecendo os mecanismos abrangidos durante os processos de deslocamento e deposição (Tabela 3).

Tabela 3: Classificação dos sedimentos clásticos de cavernas

Classe	Mecanismo(s) de Transporte	Origem	Morfologia e Textura
Fluviais	Tração, saltação, e suspenção	Alóctone com contribuição autóctone	Bancos e leitos fluviais em canais ativos; bancos e terraços em canais abandonados. Ampla variação textural: argila a seixo.
Gravitacionais	Abatimentos	Autóctone	Cones e pilhas irregulares de tamanho variado, compostos por brechas de colapso de teto ou parede. Grânulos a matacões
	Fluxo de detritos (corrida de lama)	Alóctone com contribuição autóctone	Cones, bancos de sedimentos, muitas vezes preenchendo galerias. Diamictons, brechas matriz e clastos suportados.

Fonte: Laureano (1998)

2.5 Solos em Terrenos Cársticos

Evidentemente a característica mais distinta dos solos desenvolvidos nos terrenos cársticos diz respeito à elevados teores de carbonato de cálcio observados em suas composições. Ruellan (1973) procurou distingui-los de acordo com a presença deste elemento em seus horizontes nas seguintes categorias: ausente de carbonatos; fracamente diferenciado com conteúdo de carbonato inferior a 40%; moderadamente diferenciado, apresentando conteúdo de carbonato inferior a 60%; muito bem diferenciado com presença de carbonato superior a 60%.

Shizato (1998) efetua uma síntese dos trabalhos de levantamentos pedológicos realizados no Brasil onde afirma que os solos desenvolvidos sobre influência de materiais carbonáticos podem apresentar coloração partindo desde amarelo, (2,5Y) caso dos solos da região de Cabugi, (RN) até o vermelho (10R) descrito na Serra do Ramalho (BA). Na oportunidade, o autor ainda destaca dois

grupos distintos de os quais foram relacionadas à Saturação de Bases (SB) e portanto, eutróficos e distróficos. O que mostra que muitos solos descritos como sendo de influência direta do calcário podem estar, também, recebendo influência de materiais distintos presentes no ambiente.

2.6 Impactos humanos em terrenos cársticos

Na literatura geomorfológica os sistemas cársticos possuem um capítulo à parte para suas definições e classificações. Desta maneira, o impacto humano neste ambiente, não haveria de ser diferente, tendo vista a relação muito estreita do carste à inadequação de um manejo específico para dado âmbito.

As interações entre o homem e o carste tem sido relevantes desde a era greco-romana, (Nicod et al., 1997) embora os efeitos desta interação passa a ser particularmente mais visíveis após a revolução industrial (PARISE et al., 2009).

Conforme já supracitado, há praticamente 200 anos, o carste tem servido de cenário para a atuação de diversos ramos da ciência, no entanto foi apenas a partir da segunda metade da década de 80, que o impacto das atividades antrópicas neste meio passaram a ser observadas, avaliadas, mensuradas e prognosticadas.

Merece destaque nesta questão, o compêndio organizado por Williams (1993), quando foi sumarizado em um suplemento da revista Catena, mais de uma dezena de artigos relativos aos impactos ocasionados pelo homem no Carste. Em dada síntese, diversos autores descrevem perturbações pontuais em diversas paisagens cársticas como Gams et al. (1993) fizeram na costa mediterrânea, Yuan (1993) no sul da China e Goldie (1993) nas ilhas britânicas.

Nesta mesma oportunidade, temas mais específicos também passam a ser levantados, como o caso da incidência de chuva ácida sobre o carste, (TRUGDILL; INKPEN, 1993) impactos da agricultura em cavernas carbonáticas, (HARDWICK; GUNN, 1993) os reflexos do desenvolvimento do turismo sobre as cavernas e carste, (HUPPERT et al, 1993) e por fim, os impactos geomorfológicos da mineração de calcário (GUNN, 1993).

Um dos principais reflexos do impacto humano no carste, e que nos últimos anos tem recebido enorme atenção dos pesquisadores, diz respeito ao surgimento de dolinas, especialmente as de abatimento, em áreas com adensamento humano. Significativas perdas econômicas tem sido observadas por razão do dolinamento de áreas cársticas possivelmente induzidas pela presença humana (GUTIERREZ et al. 2008). Em função disso, estudos vem sendo desenvolvidos no intuito da criação de modelos preditivos que possam antecipar e moderar, ou neutralizar, estes danos (SALVATI; SASOWSKY, 2002, Ardau et al, 2007).

Talvez o caso de maior repercussão deste tópico no Brasil, seja o “Buraco de Cajamar”. Na ocasião, no ano de 1986, houve a abertura de uma dolina no município de Cajamar, Grande São Paulo, resultando em uma depressão de aproximadamente 50 metros de diâmetro e 10 de profundidade, absorvendo oito casas. Tal evento, hoje é atribuído à extração de água do lençol freático, tirando assim o suporte hidrostático de um eventual conduto jamais localizado.

2.6.1 Perda de solo em Sistemas Cársticos

Sistemas Cársticos tendem a apresentar solos mais rasos e com considerável ocorrência de fragmentos rochosos em seus perfis, com moderada de retenção de nutrientes em função da alta lixiviação, que é resultado da maior capacidade de drenagem que o ambiente apresenta. Há portanto uma tendência mais acentuada nos processos erosivos em áreas do carste desflorestadas ou com utilização intensa.

Urushibara & Yoshino (1993) pode ser considerado a primeira averiguação sobre a perda de solos em terrenos cársticos. Na o ocasião, os autores fizeram um breve compêndio sobre observações realizadas no Japão, Jamaica, Indonésia e na antiga Iugoslávia. Os autores atribuíram distintas causas da perda de solos em cada um dos cenários, mas sempre pontuando a supressão vegetal como agente acelerador comum entre os processos.

Gillieson (1996) aponta a relação negativa entre a exploração de madeira no Canadá sobre um terreno cárstico. Segundo o autor os 75 anos de extração

resultaram em uma redução de 17% da cobertura florestal da área, ao passo que nos primeiros cinco anos de monitoramento a redução da profundidade do solo foi de 25% e nos cinco seguintes chegou a 60%.

Atualmente a China recebe muito destaque na averiguação da perda de solo no meio cárstico. Visto que uma significativa parcela de seus bilhão e quatrocentos milhões de habitantes vivem sobre os carstes das regiões sul e sudeste do país onde tem sido observado que há uma agilização dos processos de desertificação (Wang et al., 2004, Feng et al., 2016)

3 UNIVERSO DE ANÁLISE

Localizada no distrito da Lapinha, município de Lagoa Santa, a Bacia Poligonal da Vargem da Lapa foi elegida para o estudo devido a fatores como a proximidade e facilidade de acesso de um grande centro urbano como Belo Horizonte e já ter atenção despertada pelas importantes descobertas paleontológicas na região, bem como peculiaridades de seu meio físico que fizeram de Lagoa Santa, um importante centro de pesquisas, gerando considerável material relativo aos mais diversos temas das ciências naturais.

Praticamente todos os campos da pesquisa que serão citados doravante, tiveram como seu precursor, o naturalista dinamarquês Peter Wilhelm Lund. Em função de sua ocupação ainda um tanto ampla.

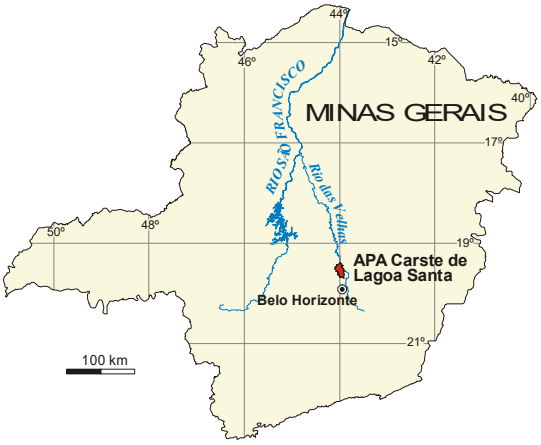
Também se faz importante a consideração da implantação da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, pelo IBAMA no Decreto nº 98.881 de 25 de janeiro de 1990, posto que seu estabelecimento exigiu a demanda de uma enorme gama de avaliações da paisagem de 37.735,58 hectares

Mais recentemente, na área que compreende o maciço rochoso calcário, na base da Bacia, foi criado por meio do Decreto Estadual 45.508 o Monumento Natural (MONA) Estadual Várzea da Lapa no intuito de resguardar o patrimônio o sítio arqueológico e espeleológico formado pelas grutas e cavidades encontradas no local. É importante salientar, que os 23,5 hectares de área do MONA, não se equiparam à área da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa uma vez que a Unidade de Conservação avança para leste do maciço, extrapolando os limites da bacia.

3.1 Localização

Inserida no município de Lagoa Santa A área estudada se posiciona na região cárstica de Lagoa Santa, a cerca de 30km ao norte de Belo Horizonte, centro sul do Estado de Minas Gerais (Figura 4).

Figura 4: Mapa do Estado de Minas Gerais, com a localização da APA Carste de Lagoa Santa.



Extraído de Strauss (2008)

Barbosa (1961) foi o primeiro a cunhar a expressão *Região Kárstica de Lagoa Santa* e posteriormente Kohler et al. (1978) delimitaram tal área, onde sem grandes rigores, é bordeada a leste pelo rio das Velhas e a oeste pelo ribeirão da Mata. A sul, o limite se dá com embasamento gnáissico Pré-Cambriano com o calcário do Grupo Bambuí, nas proximidades de Vespasiano. Finalmente ao norte, seu limite ocorre na divisa entre os municípios de Fidalgo e Matozinhos.

Em sua tese de doutorado, Kohler (1989) passa a empregar o termo *Carste de Lagoa Santa*, baseado no mesmo balizamento do trabalho de 1978. O IBAMA também lançou mão de dado termo, quando em 1990 criou a “Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa”. Em função de sua ampla utilização, o termo Carste de Lagoa Santa será empregado neste trabalho quando feita a referência à dada região.

Mediante a ótica geomorfológica, Piló (1998) reconhece que o carste de Lagoa Santa seguramente avança para o norte de Matozinhos, bem como para os municípios de Funilândia e Prudente de Morais. O autor sumariza que o substrato rochoso e as características pedomorfológicas comuns da região, abrangem também parte destes municípios. Entretanto tal definição de seus limites ainda carecem de estudos específicos

3.2 Clima

Uma vez que o ácido carbônico se posiciona como o maior agente modelador do relevo cárstico, os fatores climáticos como precipitação e temperatura exercem uma influência direta na circulação hídrica e no equilíbrio e cinética da dissolução.

3.2.1 Temperatura

De acordo com Ribeiro (1994), a circulação atmosférica na região de Lagoa Santa está em sua superfície, submetida à atuação do Anticiclone semi-estacionário do Atlântico Sul (APAS). Dele partem os ventos Nordeste e Sudeste, que influenciam grande parte do Estado de Minas Gerais e mantêm muitas vezes a frontogênese ativa. A principal característica deste sistema é sua notável estabilidade, responsável por grandes períodos de tempo estável, com pouca nebulosidade e consequentemente, pouca precipitação. Não à toa, o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, se encontra no Carste de Lagoa Santa.

Nimer & Brandão (1989) definiram o clima da região como típico do cerrado brasileiro, com duas estações bem definidas. A precipitação média anual é de 1325mm/ano, com a temperatura girando em torno dos 23º C

Sob a ótica térmica, é possível afirmar que junho e julho são os meses mais frios do ano, quando as temperaturas médias máximas estão em torno dos 19º C, enquanto as mínimas, giram na casa dos 11º C. Neste período ondas de frio podem provocar significativas quedas na temperatura entre maio e setembro. Segundo o reporte histórico do naturalista Prussiano Burmeister, durante sua visita a Peter Lund, o mês de julho de 1851 foi efetivamente frio, com a ocorrência de geadas.

> *"Durante minha permanência (Lagoa Santa), nos meses de maio, junho e julho, a temperatura apresentava-se muito baixa ao levantar do sol, marcando 5 a 8 graus R (6,2 a 10 graus C); subia depois para 15 ou 16 graus (18,7 ou 20 graus C) e, nas horas mais quentes do dia. Para 19 ou 20 graus R (23,7 ou 25 graus C); ao anoitecer, baixava para 12 ou 13 graus R (15 ou16,2 graus C), o que fazia com que sempre sentisse frio no meu quarto. A temperatura alta do meio dia passa rapidamente e não permite o armazenamento do calor. Os dias mais frios foram os do princípio de julho, quando o termômetro chegou a descer até 3 graus R (3,7 graus C). Não somente os telhados ficaram*

> *cobertos de geada, mas também folha das árvores, especialmente das bananeiras, nas quais apareceram depois pequenos pontos castanhos. No dia 10 de julho, observou-se um Lagoa Santa "velas de gelo" da grossura de um dedo, pendentes dos telhados..."*
>
> *"O ano de 1851 foi o mais abundante em chuvas e dos mais frios que os brasileiros tinham lembrança" (BURMEISTER, 1853, apud SALVATERRA , 1980)*

O período da primavera ocorrem grandes elevações de temperatura. Entretanto é muito comum nesta época, o atraso no período das chuvas gerando fortes ondas de calor nos meses de outubro e novembro, quando as máximas absolutas podem superar os 35º C.

Já no verão é o período que ocorrem os maiores valores de nebulosidade e consequentemente, precipitação, especialmente no seu início, quando ocorre uma menor incidência de radiação na superfície, acarretando em temperaturas menores que as observadas em novembro e demais meses do verão (RIBEIRO, 1994). Seu mês mais quente é fevereiro, quando a média das temperaturas, chega a 23º C.

3.2.2 Índices Pluviométricos

A precipitação da região é marcada incialmente por uma estação de seis a sete meses, onde ela é inferior à evapotranspiração potencial. Tal estação tem início entre abril e maio, seguindo até o início da primavera, e encontra seu déficit máximo entre os meses de agosto e setembro. Neste período o escoamento concentrado em superfície é praticamente nulo, ou inexistente. Todavia, ocorrem reservas hídricas na zona epicárstica e subterrânea, especialmente em condutos de cavernas sujeitos a ação do regime freático. Seu déficit anual médio é da ordem de 176mm.

A partir do mês de outubro pode ser observada a abertura do período chuvoso, mas somente entre novembro e dezembro, inicia-se a formação do excedente hídrico (474mm), o qual se mantém até março. O trimestre dezembro-janeiro-fevereiro é o mais chuvoso, o de maior excedente hídrico e o de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo mais ativo.

As classificações climáticas são normalmente fundamentadas na relação entre algumas variáveis climatológicas e fatores ambientais intervenientes, tais como vegetação, solo, dentre outros. A classificação de Köppen (IN HERAS, 1972) baseia-se na precipitação e na temperatura média do ar e enquadra a região da APA no tipo climático Aw, ou seja, tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso, uma vez que a temperatura média do mês mais frio é superior à 18ºC e os totais pluviométricos anuais encontram-se em média entre 1000 e 1500mm.

Nimer (1977) desenvolveu uma classificação climática para as regiões brasileiras baseada em critérios adaptados de diversos autores. De acordo com sua classificação, a região apresenta clima tropical subquente semiúmido, com um período seco de quatro meses, iniciando se em maio e estendendo-se até agosto.

3.3 Contexto geológico

A região da APA Carste de Lagoa Santa, segundo Almeida (1977), localiza-se no sudoeste da província estrutural pré-cambriana do cráton São Francisco, inserida na área do grupo Bambuí, no seu bordo oriental, que é subdividido em duas formações: Sete Lagoas e serra de Santa Helena.

O grupo Bambuí compreende uma sequência pelito-carbonática capeada por um pacote de sedimentos com espessura de 600m a 800m (CPRM, 1994). A sedimentação do grupo Bambuí ocorre normalmente sobre uma crosta continental orientada relativamente na direção N–S, por falhas antigas do escudo cristalino.

Na APA Carste de Lagoa Santa, conforme o mapeamento geológico realizado pela CPRM (1994) (Anexo 1), a formação Sete Lagoas é constituída por cerca de 200m de espessura de calcários cinzentos a negros (Grossi & Quade, 1985), compreendendo rochas com mais de 95% de calcita, ao lado de quartzo, feldspato, muscovita, clorita, apatita e fluorita, que Schoell (1973) denominou de fácies Lagoa Santa.

Devido à presença de grafita, o topo dos afloramentos assume coloração mais escura com tonalidade inclusive negra e, na base, cores mais claras devido à maior presença de quartzo e filissilicatos (clorita verde-clara e muscovita), sendo sua granulação usualmente fina e afanítica. Essa formação foi subdividida por Tuller et al. (1991) em dois membros: Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

Tabela 4: Geologia da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa

Unidade Estratigráfica	Unidade Litoestratigráfica		Litótipos/Litofácies	Relação de Contato	Deformação/metamorfismo	Ambiente
Grupo Bambuí	Formação Serra de Santa Helena		Sequência metapelítica, representada por metassiltitos e metargilitos, com estratificação plano-paralela	Brusca, alguns locais agradacional	Deformação progressiva e heterogênea, com deslocamento de baixo ângulo. Regime em condições dúctil-rúptil a dúctil.	Marinho (Transgressivo)
	Formação Sete Lagoas	Membro Lagoa Santa	Sequência carbonática representada predominantemente por calcarenitos e secundariamente por calcissiltitos e calcirruditos. Os calcarenitos são calcários cinza escuro e negro, com abundante calcita, preenchendo vazios e fraturas	Gradacional, as vezes indefinida	Deslocamento progressivo e heterogêneo, com deslocamento de baixo ângulo. Regime predominante ductilruptil.	Marinho (Regressivo)
		Membro Pedro Leopoldo	Sequência carbonática representada por calcissiltitos e subordinadamente por calcarenitos e margas. Os calcissiltitos são calcários impuros, às vezes, dolomíticos, coloração cinza, com intercalações escuras	Discordante	Idem Membro Lagoa Santa, com maior efeito de ações tetônicas sobre os calcários impuros.	Marinho (Transgressivo)

3.3.1 Membro Pedro Leopoldo

Representado pelos calcissiltitos e, subordinadamente, calcarenitos e margas, é formado no ciclo transgressivo, com a invasão de águas continentais pelo mar. Devido à pequena e restrita circulação das águas em vários pontos da

bacia, ocorreu a hipersalinidade dessas águas, com precipitação do calcário mais impuro, fino e claro (CABRAL, 1994). Essas rochas adquiriram laminação incipiente com abundante formação de minerais micáceos, em virtude do efeito de ações tectônicas de caráter regional.

3.3.2 Membro Lagoa Santa

Representado pelos litótipos calcarenitos e, subordinadamente, calcissiltitos e calcirruditos, é formado no ciclo regressivo, com o recuo do nível do mar, onde ocorreu a deposição de calcários mais puros, grosseiros e escuros (CABRAL, 1994). Trata-se de um metacalcarenito formado principalmente por grãos calcíticos, com variação vertical de tamanho da areia muito fina a fina, disposto em camadas tabulares ou ligeiramente onduladas, com espessura variando de delgada a espessa.

3.3.3 Formação Serra de Santa Helena

A formação Serra de Santa Helena (KOHLER, 1989), recobre os calcários da formação Sete Lagoas na região, com cotas superiores a 850m, apresentando espessuras de até 200m. É constituída essencialmente por folhelho, com contribuição menor de calcário. O folhelho tem sido correntemente denominado de ardósia, devido a uma fissilidade que gera placas de espessura uniforme e de uns poucos metros quadrados. Apresenta cores verde, verde-acinzentada ou verde azulada, quando fresco, e amarela quando decomposto (GROSSI; QUADE, 1985). Os arenitos subordinados são de composição variada e apresentam cores claras devido, principalmente, à presença significativa do quartzo. Essas rochas variam quanto à coloração, possuindo tons avermelhados em função do cimento ferruginoso presente em sua constituição.

3.4 Vegetação

A região do planalto de Lagoa Santa encontra-se sob a influência de dois domínios fitogeográficos principais: o da mata atlântica e o dos cerrados (FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - FIBGE, 1992). A vegetação apresenta ainda algumas peculiaridades

relacionadas à presença de enclaves de vegetação semelhante à caatinga, nas áreas de afloramentos calcários, que seriam, segundo Ab'Saber (1977), originados dos processos de expansão e retração dos climas secos ocorridos durante a evolução quaternária do continente Sul-Americano.

A convite de Lund, Eugenius Warming realizou a primeira caracterização do domínio vegetal de Lagoa Santa, entre os anos de 1863 e 1866, quando coletou mais de 2600 espécies de plantas, distribuindo-as entre vários botânicos europeus para estudos de sistemática vegetal. O resultado foi o primeiro tratado sobre ecologia vegetal com seu enfoque direcionado para a vegetação do cerrado, publicado em dinamarquês em 1892, sob o título de: "Lagoa Santa – Et Bitrag til den Biologiske Plantegeografi" (WARMING, 1908).

Na oportunidade, Warming dividiu a vegetação de Lagoa Santa em primitiva e secundária, onde a primeira seria classificada como a vegetação natural, amparada pelas condições do meio físico e subdivida em matas sobre os afloramentos de calcário, os campos posicionados sobre as superfícies aplainadas, ao longo dos brejos as várzeas e finalmente, as plantas aquáticas instaladas nas lagoas.

Já a condição da vegetação secundaria dizia respeito aquela introduzida pelo homem através de suas culturas, como as lavouras e pastagens, atentando ao fato destas terem sido assentadas sobre antigos solos de matas.

Propostas mais atuais sobre a distribuição original das formações vegetais podem ser percebida a partir da análise da estrutura e da composição dos fragmentos remanescentes. As diferentes formas de manejo da vegetação, as diferentes épocas em que os fragmentos foram explorados e abandonados à regeneração, bem como a mistura de espécies de diferentes formações durante o processo de sucessão natural, fazem com que hoje a delimitação dos tipos vegetais se torne imprecisa (PILÓ, 1998). No âmbito geral podem ser caracterizadas nos seguintes domínios:

Nas dolinas e arredores dos afloramentos, destaca-se a Floresta Estacional Semidecidual, sendo condicionada por um período de intensas

chuvas, seguido por estiagem acentuada, também podendo ser designada como mata Mesófila, indicando sua adaptação a um clima sujeito à sazonalidade.

Instalada sobre e entre os afloramentos calcários, encontra-se a Floresta Estacional Decidual, apresentando mais de 50% dos indivíduos que perdem totalmente as folhas na época de estiagem.

O cerrado ocorre principalmente nas superfícies mais aplainadas com solos mais rasos e/ou mais ácidos e que ocupavam originalmente, sob diferentes formas, grandes extensões do carste de Lagoa Santa.

Nas lagoas perenes ou temporárias pode-se observar uma vegetação hidrófila e higrófila, sendo caracterizada por plantas herbáceas ricas em espécies indicadoras de umidade edáfica e/ou dependentes da presença da água em seu ciclo vital.

3.5 Histórico da ocupação humana

Sendo palco de estudos arqueológicos a cerca de 170 anos, a região de Lagoa Santa se confunde com a história da arqueologia brasileira, sendo considerado o nicho de maior aceitação no meio acadêmico internacional com sua ocupação pré-histórica se iniciando a cerca de 12.000 anos (PROUS, 1991; STRAUSS et al, 2016)

As primeiras descobertas catalogadas no Carste, são conferidas à Peter Lund, quando durante escavações de megafauna extinta, deparou-se com material esqueletal humano, algo que para o conhecimento da época, se apresentava como irreal. Tal coexistência entre humanos e megafauna, fez do Carste de Lagoa Santa, o cenário de inúmeras pesquisas acadêmicas que buscavam confirmar dada hipótese, resultando na recuperação de diversos sítios arqueológicos na região. Dentro deste contexto, se faz digna a citação do projeto encabeçado por Neves “Origens e Microevolução do Homem na América: uma Abordagem Paleoantropológica”.

As principais características da cultura material encontrada na área, apontam que os primeiros habitantes de Lagoa Santa dispunham de tecnologias

básicas, visando suprir o essencial nas atividades de caçadores coletores. Seus instrumentos se limitavam em sua grande maioria a utensílios trabalhados em quartzo hialino. Entretanto, suas práticas mortuárias, executadas nas entradas das cavernas, já se apresentavam extremamente complexas, pratica esta, perpetrada por mais de 4000 anos. (STRAUSS et al, 2015). Já a arte, aparece representada por grafismos sobre o calcário, caracterizada principalmente por representações antropomórficas. (NEVES et al, 2012)

Posteriormente, no holoceno médio, é possível observar a modernização da cultura material das populações com o emprego de conchas de megaloburinos e ossos, em especial de cervídeos, para a manufatura de espátulas e anzóis. As ferramentas de pedra também passam por um aprimoramento no seu desenvolvimento. Também é neste período que a arte rupestre sofre grande expansão, com seus painéis apresentados nos paredões dos maciços calcários.

A dominação da agricultura em Lagoa Santa, coincide com o restante do Brasil, já por volta da era cristã. De acordo com Prous (1991), é neste momento que os ocupantes dos abrigos adotam a cerâmica. Finalmente, ocorre o primeiro contato com as primeiras bandeiras capitaneadas por Fernão Dias no ano de 1675, seguidas da busca pelo ouro, resultando em um rápido extermínio das sociedades indígenas preteritamente estabelecidas. É neste momento que a vegetação do carste passa a ser severamente suprimida, acarretando em uma significativa mudança da paisagem.

O estabelecimento das primeiras fazendas ligadas à mineração e pecuária, se deu nos séculos XVIII e XIX. Neste segundo ocorre o primeiro ciclo de exploração econômica das cavernas da região, visando a extração de salitre para a produção de pólvora (GOMES; PILÓ, 1992). Particularmente, o município onde se encontra a área de estudo, Lagoa Santa, teve sua fundação estabelecida em 1733 pelo tropeiro Felipe Rodrigues.

Com a mudança da capital de Ouro Preto para Belo Horizonte em 1897, a região de Lagoa Santa, finalmente foi submetida ao desenvolvimento, no intuito de suprir as necessidades de subsistência da nova capital. Finalmente, na

década de 50, com o pleno desenvolvimento da capital, ocorre a implantação das industrias de aproveitamento do calcário para a fabricação de cimento Portland por fábricas como Cauê, Ciminas, Ical e Cimento Itaú.

Atualmente, o IBGE estipula que a população de Lagoa Santa seja de 52.520 habitantes, em alto grau de urbanização (Tabela 5). A proximidade com a capital, faz com que muitos de seus habitantes utilizem a cidade apenas como residência, tendo como Belo Horizonte, o ambiente de trabalho e renda, caracterizando-a como “cidade dormitório”.

Tabela 5: Distribuição da população do município de Lagoa Santa

População em 2016 (estipulado IBGE)	Rural	Urbana	Índice de Urbanização (%)
52.520	3.571	48.949	93

O Produto Interno Bruto (PIB) do município está sedimentada no setor de serviços, acompanhado da indústria. Já o setor primário, corresponde a uma ínfima parcela na geração de riquezas de Lagoa Santa (Tabela 6)

Tabela 6: Distribuição do PIB de Lagoa Santa por setor.

Setor Primário	Setor Secundário	Setor Terciário	Total
4.571	408.982	816.945	1.230.498

A Bacia Poligonal da Vargem da Lapa, tem uma população rural, e tem sua economia baseada em serviços na agricultura. Merecem destaque a atividade econômica ligada ao turismo na Gruta da Lapinha, sucedendo no estabelecimento de uma pequena rede hoteleira e de restaurantes para o primeiro. Já o primeiro setor, é representado por discretas atividades pecuárias, culturas de milho, capim para gado e silvicultura.

Este acelerado processo de ocupação do solo na região, fez com que o Carste de Lagoa Santa, venha ser submetido a um acelerado processo de

depreciação da qualidade ambiental, em especial no tocante à recursos hídricos e dos patrimônio histórico e espeleológico brasileiro.

Tal quadro, levou Piló (p. 40, 1998) a expressar a condição em que se fazia justa a criação da APA Carste de Lagoa Santa:

> *"Diante da sua importância como patrimônio cultural brasileiro, assim como pela crescente conscientização ambiental sobre a fragilidade dos sistemas cársticos, grande parte da região do planalto foi decretada Área de Proteção Ambiental (APA Carste de Lagoa Santa – Decreto Federal nº 98.881, de 26 de janeiro de 1990)*

3.6 Geomorfologia

Ao sul do Planalto de Lagoa Santa encontra-se a Depressão de Belo Horizonte, que é limitada a SW-NE pela escarpa da Serra do Curral. O entalhe do modelado se deu sob regime tropical, sendo constituído por um típico sistema de morros policonvexos desenvolvido sobre rochas graníticas. A drenagem é feita pelo Córrego dos Arrudas, tributário do Rio das Velhas.

A leste o Planalto de Neves apresenta-se como um grande plano inclinado cuja extremidade delimita o limite entre a bacia do Rio das Velhas e a do Rio Paraopeba. O relevo é marcado por significativas incisões fluviais, assinalado por esporões alongados separados por amplos vales. A drenagem intensa, direcionada majoritariamente ao Ribeirão da Mata, e sofre um descotinuamento abrupto pela soleira migmatítica da Serra dos Ferradores. O Ribeirão da Mata separa o Planalto de Neves, a leste, do Planalto de Lagoa Santa, a oeste. Este rio apresenta direção NW-SE em seu alto curso, mas, após receber o Córrego das Areias inflete radicalmente, em forma de cotovelo, para leste. Após esta inflexão ele passa a drenar a Depressão de Vespasiano. Esta depressão apresenta relevos moderados e está encaixada entre o front da cuesta do Planalto de Lagoa Santa, a norte, e o relevo do embasamento a sul.

O Planalto de Lagoa Santa encontra-se entre as cotas 650m e 900m. A sul é bordeado pela Depressão de Vespasiano, a leste pelo Planalto de Neves e a norte pela Depressão de Sete Lagoas. Desenvolve-se sobre rochas filíticas e carbonáticas, nas quais se apresenta o relevo cárstico característico deste compartimento geomorfológico. O flanco norte do Planalto de Lagoa Santa foi

dissecado por processos erosivos, dando origem à depressão de Sete Lagoas a uma cota de cerca de 750 metros.

O bloco interfluvial Rio das Velhas - Ribeirão da Mata (IRV) é a unidade de relevo na qual se insere a Depressão Poligonal da Vargem da Lapa (Anexo 2). Sua topografia é decorrência do escalonamento sub-horizontal das litologias que o compõem. No extremo ocidental aloja-se o vale do Ribeirão da Mata. Adjacente a ele ergue-se a Serra dos Ferradores, aonde no topo encontram-se os filitos da unidade Serra de Santa Helena, sendo este, o ponto mais alto do bloco interfluvial. A partir dele estabelece-se, para leste, uma redução altimétrica escalonada, que culmina nas planícies cársticas. Estas por sua vez estabelecem a conexão hidrológica entre o carste e o Rio das Velhas.

Os relevos não cársticos constituem aproximadamente 30% do bloco interfluvial e se e podem ter se desenvolvido mediante três litologias distintas; o embasamento, sobre a unidade dos calcifilitos ou sobre os próprios filitos. O quadro apresenta pequena expressão em área, aparecendo apenas no vale do Ribeirão da Mata e nas soleiras da Serra dos Ferradores. Já os calcifilitos estão presentes na Depressão de Vespasiano, nas bordas do Planalto de Lagoa Santa e na região do Fidalgo, sendo os responsáveis pelo embasamento impermeável do carste, podendo apresentar feições cársticas em função da corrosão de lentes de carbonato neles contidas (KOHLER, 1989). Finalmente, os filitos estruturam o cume dos alinhamentos serranos de Confins e da Serra dos Ferradores, localizados entre 830-850 metros de altitude. A superfície delimitada por estas serras seriam remanescentes da Superfície Sul-americana sugerida no trabalho de King (1956), cujos topos tem como principal característica o formato aplainado e alongado na direção SE-NW.

Os outros 70% restantes do IRV, são constituídos pelo modelado cárstico. Kohler, os agrupou em quatro unidades fisiográficas distintas. A primeira delas que se encontram nas cotas mais altas do calcário. Este compartimento encontra-se próximo à cidade de Matozinhos, onde um corredor deprimido estabeleceu-se no sentido SW-NE, criando uma conexão entre a planície do Mocambeiro e a seção do Ribeirão da Mata.

A seção dos Cinturões de Ouvalas pode ser observada dentro de uma depressão irregular, marginal ao flanco leste da Serra dos Ferradores, na qual há um alto índice de ocorrência de uvalas

O Planalto de Dolinas se apresenta abaixo das cotas de 800 m e a cima das cotas de 700 m. As dolinas apresentam um alinhamento SW-NE sugerindo um rígido controle estrutural em sua gênese. Alguns dos sítios arqueológicos mais conhecidos estão inseridos neste compartimento fisiográfico, como são os casos de Cerca Grande, Lapa Vermelha e Lapa do Santo.

O último compartimento fisiográfico estabelecido por Kohler são as Planícies Cársticas, ou poljés. Os poljés são uma forma típica dos terrenos cársticos. Segundo Pilo (1998):

> *"...polje é uma ampla depressão fechada, com comprimentos e larguras que chegam a dezenas de quilômetros, com paredes abruptas, fundo plano rochoso ou, mais comumente, recoberto por argilas de descalcificação, aluviões ou depósitos lacustres." Segundo Gams (1978, Apud PILÓ, 1998)*

Para se classificar uma depressão como polje ela precisa apresentar um largo piso horizontal de rocha ou material inconsolidado, uma bacia fechada com bordas íngremes, pelo menos em um lado, e drenagem tipicamente cárstica. A gênese do poljé está profundamente relacionada com algum fator que impeça o prosseguimento do entalhamento vertical do terreno. Assim, quando a erosão atinge uma rocha insolúvel ou o nível de base, o vetor erosivo horizontaliza-se levando à dissolução progressiva das bordas da depressão.

O compartimento das planícies cársticas localiza-se abaixo dos 670 metros de altitude com uma superfície contínua de mais de 4 quilômetros quadrados. Ambas planícies cársticas do IRV, a do Fildalgo e a do Mocambeiro, estão próximas ao Rio das Velhas e são alimentadas por águas autóctones do carste e periodicamente são inundadas pelas águas do aquífero cárstico. A Lagoa do Sumidouro ocupa cerca de 80% da planície do Fildalgo, um amplo vale cego alimentado pelo córrego do Samambaia. O fundo da lagoa é constituído por calcifilitos impermeáveis, o que condicionou o seu desenvolvimento lateral. Inclusive, segundo Journaux et al. (1978. Apud KOHLER 1989), a presença de

quartzo no edifício rochoso do Rochedo do Fidalgo sugere uma fácies próxima ao calcifilito. O sítio arqueológico do Sumidouro, foco do presente trabalho, situa-se na margem sudoeste da Lagoa do Sumidouro, próximo ao Rochedo do Fidalgo.

3.7 Solos de Lagoa Santa

As primeiras observações acerca da condição pedológica no carste de Lagoa santa foram feitas por Lund (1950) e posteriormente Lanari (1909). Entretanto em função do grau de compreensão sobre os solos na época, tais avaliações não passaram de constatações positivistas acerca da condição do material como textura e cor do material.

Estudos relativos a genética do material pedológico, foram propostos pela primeira vez por Barbosa (1961) quando foi sugerido que o material que revestia o modelado seria oriundo das rochas metamórficas ou calcários. Sequencialmente, Cutard e al. (1978) afirma que a cobertura do carste seria proveniente dos filitos alterados in loco e também do calcário da área.

Auler (1988) destaca os solos da região como um agente geomorfológico, visto que o material serviria como elemento impermeabilizador dos fundos de dolina e bases de vale.

As primeiras caracterizações especificamente pedológicas no carste, foram trazidas na tese de Kohler (1989), quando foram descritas três formações pedológicas, os solos lateríticos vermelho-amarelado e vermelho, desenvolvidos sobre rochas filíticas e os solos lateríticos vermelho escuro, correspondentes às coberturas originadas sobre as rochas carbonáticas.

Munido da proposta da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica, Boulet et al (1992), desenvolveram o primeiro trabalho em uma topossequência na área do Sistema Cárstico da Lapa Vermelha, apresentando uma clara diferenciação no material ao longo das vertentes. Além disso os autores colocam que a cobertura pedológica é capaz de expor variações no nível de base de uma vertente, no caso o afundamento de uma vertente.

O projeto VIDA da CPRM (1994) (Anexo 3) apresenta uma caracterização sistemática sobre os solos da região do carste, destacando as seguintes ordens, embora que ainda com o antigo nome “Podzol”: Podzólico Vermelho Amarelo Álico, Podzólico Vermelho Escuro Eutrófico, sendo estes oriundos de material carbonático do grupo Bambuí, enquanto o Cambissolo Eutrófico e Latossolo Vermelho Escuro Distrófico, teriam como fonte outras litologias não carbonáticas.

O estudo realizado por Shinzato (1998) pode ser considerado mais puro no tocante à pedologia. Na ocasião, o autor realizou sete perfis em diferentes posições geomorfológicas da APA no intuito de buscar um melhor entendimento na acerca da influência do substrato carbonático na formação dos solos da região. Posteriormente sua pesquisa veio a servir de base do item “pedologia” para o relatório do meio físico da APA Carste de Lagoa Santa.

Um equilíbrio entre a morfogênese e a pedogênese foi apresentado por Piló (1998) ao realizar um complexo diagnóstico da cobertura pedológica do carste e baseado em análises de macro e micromorfologia, onde foi possível compreender a drenagem interna entre os horizontes. Também se observou que os horizontes da cobertura pedológica, apresentam-se paralelos tanto em relação à topografia atual, quanto ao epicarste.

De acordo com o autor o fato do substrato calcário da área apresentar proporções de carbonato de cálcio superior a 90%, inviabilizaria a formação de um pacote pedológico oriundo deste sedimento químico. Desta forma entende-se que os solos das áreas de planalto da APA, são um material residual dos metapelitos compostos por siltitos, argilitos e arenitos subordinados, referentes à formação Santa Helena, que outrora recobriram totalmente a formação Sete Lagoas, tanto seu membro Lagoa Santa, ou Pedro Leopoldo.

O relatório de Zoneamento Ambiental da APA Carste de Lagoa Santa procurou relacionar o as classes de solos a duas feições fisiográficas distintas, no caso a superfície rebaixada de Lagoa Santa-Sete Lagoas e as áreas de planalto.

Na primeira, ocupadas em sua maior parte, pelos Gleissolos e Solos Aluviais, mal drenados. Apesar de serem consideradas como áreas de alta fragilidade natural, possuem baixo risco de erosão por ocorrerem em relevo plano. Já as áreas de planalto chegam a apresentar uma gama maior de classes onde predominam os Latossolos Vermelho-Escuros seguidos dos Cambissolos e, por último, dos Argissolos Vermelho-Escuros. Sempre com textura muito argilosa estes solos são bem drenados, geralmente profundos, muito porosos e permeáveis

Nas dolinas, observadas especialmente no Planalto das Dolinas – região central da APA, são encontrados os Cambissolos Gleicos eutróficos de textura muito argilosa. No relatório é salientado que em tal fato geomorfológico há a ocorrência de surgência e ressurgência, caracterizando-se como um local de vulnerabilidade ambiental, se tratando de zonas de recarga de aquífero.

METODOLOGIA

O desenvolvimento metodológico deste estudo foi desenvolvido em quatro partes, os quais serão expostos a seguir.

3.8 Eleição da área de estudo

O Carste de Lagoa Santa apresenta enorme riqueza de elementos físicos na paisagem, tornado impossível envolvê-lo como um todo durante uma pesquisa de mestrado. Desta forma foram necessárias saídas à campo para selecionar um recorte que de certa forma pudesse representar a APA dentro de suas principais especificidades, no caso a presença antrópica e a bacia poligonal centrípeta, assim sendo elegida a poligonal da Vargem da Lapa.

A elevação da região do Carste de Lagoa Santa à condição de uma Área de Proteção Ambiental, no ano de 1982, acarretou na elaboração de enorme quantidade de material cartográfico e literário que puderam ser somados a já mais que centenária produção acadêmica empreendida no local.

Desta maneira, o suporte cartográfico tocante à geologia, pedologia e geomorfologia (Anexos 1, 2 e 3) utilizados nesta tarefa e em escala 1:50000, tiveram seu desenvolvimento durante o Programa GATE - Informações para a Gestão e Administração Territorial, executado pela CPRM - Serviço Geológico do Brasil, no DEGET - Departamento de Gestão Territorial, no Projeto Zoneamento Ambiental da APA Carste de Lagoa Santa - MG, executado pela Superintendência Regional de Belo Horizonte - SUREG/BH

A base cartográfica foi gerada a partir da digitalização das folhas SE.23-Z-C-II, Sete Lagoas; SE.23-Z-C-III, Baldim; SE.23-Z-C-VI, Lagoa Santa e SE.23-Z-C-V, Pedro Leopoldo, todas da FIBGE. E a editoração cartográfica executada na GERIDE/CPRM/BH

3.9 Atividades de Campo

É possível considerar que as atividades de campo realizadas neste estudo sejam divididas em três eixos metodológicos, no caso o levantamento

pedológicos, a obtenção de fotos aéreas e a topografia espeleológica. Tais atividades desenvolvidas *in loco* serão expostas a seguir.

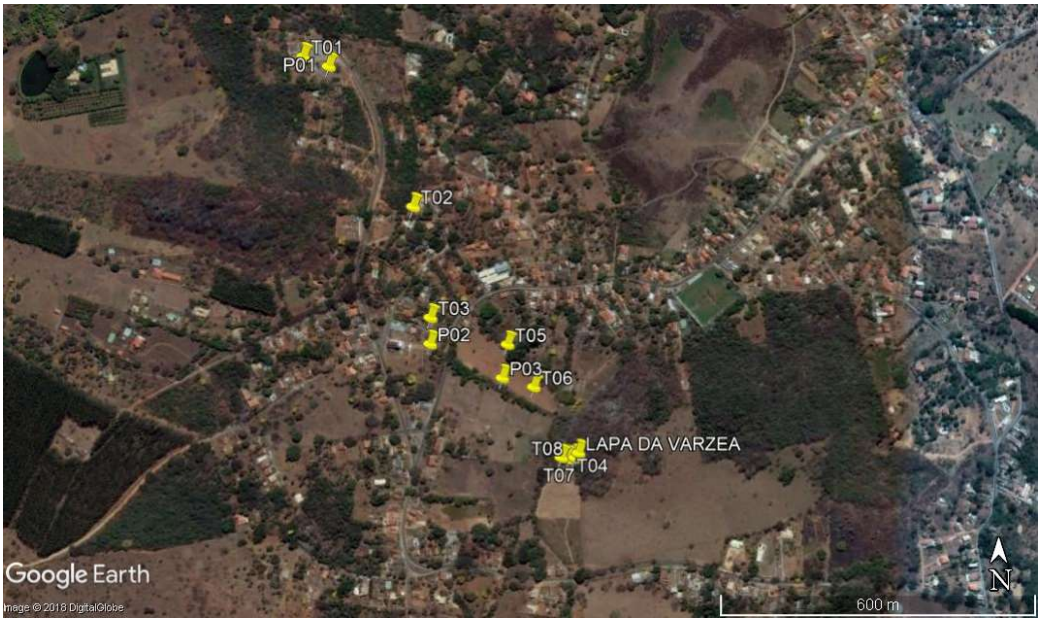
3.9.1 Levantamento Pedológico

Somente com a análise de perfis e tradagens é possível classificar os solos e estabelecer as unidades de mapeamento com suas respectivas distribuições geográficas, a serem confirmadas nos serviços finais de escritório. Dessa forma foi realizada uma topossequência buscando avaliar, conforme a posição topográfica, uma série de variações condicionadas pela modificação dos fatores.

As sete tradagens executadas ao longo da vertente objetivaram a confirmação dos limites definidos no mapeamento pedológico realizado na ocasião da implantação da APA (Anexo 3). As tradagens serviram como uma ferramenta para a definição final dos locais onde seriam realizadas os perfis e consequentemente, as coletas de solo. Mesmo que, ainda em campo, brevemente analisado e descrito, o material recuperado no trado, não foi considerado adequado para a coleta e posterior análise, uma vez que o material poderia ser submetido à contaminação de partes superiores daquilo que era perfurado.

A abertura e a descrição dos perfis de solo no campo foram realizadas em acordo às normas do CNPS/ EMBRAPA, preconizadas no Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo, (LEMOS; SANTOS, 2005). Já seu posicionamento foi feito respeitando o padrão dos terços superior, médio e inferior da vertente. A coleta de amostra no endocarste, ocorreu na Lapa do Beijo, caverna localizada na base da bacia e que, ao contrário da Vargem da Lapa tem acesso muito mais controlado, abreviando o risco de degradação das condições originais do depósito

Foto 1: Distribuição de tradagens e perfis



Assim sendo, foram coletadas um total de 10 amostras das quais nove diziam respeito aos três perfis pedológicos e a décima trata-se da greta (Fotos 2, 3, 4 e 5) de superfície onde se almejava elucidar as características físicas e químicas dos material deposional confinado.

Foto 2: Perfil 1

Foto 3: Perfil 2

Foto 4: Perfil 3

Foto 5: Trincheira aberta na Lapa do Beijo

Os perfis e tradagens foram georreferenciados através do Sistema de Posicionamento Global (GPS), utilizando-se o aparelho Garmin modelo GPSmap 62. Aqueles que foram executados no interior das cavernas, tiveram seu posicionamento exposto nos mapas das cavernas.

As tradagens foram feitas com um trado de rosca, enquanto para a abertura de perfis foram utilizados enxadão, pá, vanga, martelo, faca e trena. Finalmente, ainda em campo, era feita a descrição morfológica de perfis de solo com o auxílio da Tabela de Munsell.

3.9.2 Utilização de Remotely Piloted Aircraf (RPA)

Embora esta pesquisa em si se tratar de uma escala espacial relativamente diminuta na ótica geomorfológica, a utilização do software Google Earth não se faria muito conveniente em função do tamanho alto do pixel disponibilizado pelo mesmo.

Uma alternativa para a observação mais detalhada dos fatos geomorfológicos de menor escala, da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa, seriam as fotografias aéreas. No entanto o material disponível para tal atividade foi produzido pela Companhia Elétrica de Minas Gerais S. A (CEMIG) no ano de 1989. Desta maneira, por dada pesquisa ter como sustentação têmporo-espacial demasiadamente diminuta, este material também não se mostraria plenamente adequado para a tarefa.

A solução encontrada para a melhor avaliação da escala mais modesta, foi a utilização de um Drone para a obtenção das ortofotos da área da pesquisa em uma nova metodologia chamada RPA (Remotely Piloted Aircraft) (CUNHA et al., 2016). O equipamento da marca DJI, modelo Phanton 3 dispõe de câmera com sensor fixo Sony Exmor de 1/3 polegadas e resolução de 12,4 MP instalada um gimbal - dispositivo de giroscópio para estabilizar a câmera. Abertura da lente de f/3,61. O ISO utilizado nas fotos foi de 100, enquanto a velocidade do obturador foi de 1/100 de segundo, suficiente para estabilizar qualquer movimento brusco na imagem. O RPA conta com baterias de 4.480 mAh possibilitando autonomia média de 25 minutos.

Somado a isso, o aparelho conta com posicionamento via Global Navigation Satellite System, (GNSS) sistema este, que opera simultaneamente com a estrutura satelital estadunidense, (Navstar GPS) russa (GLONNAS) e

europeia, (Galileo) permitindo o georreferenciamento de excelente precisão de todas as imagens obtidas.

A administração do voo do RPA foi feita de maneira autômata pelo software para *smartphone* específico para o trabalho com RPA. Neste software, cabe ao usuário apenas gerar um polígono de onde o RPA deverá realizar as imagens, a que altura elas deverão ser tomadas e o percentual de sobreposição em latitude e longitude das tais. Feito isso, o próprio software estipula a quantidade de imagens e tempo de voo para a obtenção das mesmas, além de controlar trajeto do aparelho durante tal atividade.

Foram realizados dois grupos de voos para a obtenção das fotos ortogonais ao solo em duas altura distintas, sendo uma a 200 metros de altitude do ponto de partida do aparelho buscando a cobertura total da bacia poligonal enquanto o segundo, foi realizado a uma altura de 75 metros, visando captar ainda mais detalhes das posições inferiores da bacia.

Para as imagens a 200 metros foram feitos dois voos apenas por precaução em relação à autonomia das bateria. Na ocasião o aplicativo obteve 469 fotografias com sobreposição longitudinal de 60% e transversal de 40%. Já para o único voo a 75 metros de altura, foram realizadas 189 fotos com a mesma taxa de sobreposição entre elas.

3.9.3 Topografia espeleológica

A terceiro eixo metodológico praticado em campo, diz respeito ao mapeamento espeleológico. Por razões obvias, sistemas sensoriamento remoto e georreferenciamento espacial, utilizados no mapeamento de superfícies, não são operantes dentro de cavernas. Desta maneira a indicação de pontos de coleta, bem como a apresentação dos três elementos da geomorfologia – formas processos e materiais, podem ser representados no produto final obtido no “mapeamento da caverna”

O mapa topográfico da caverna Vargem da Lapa, elaborado no ano de 2015, foi gentilmente cedido pelo Meandros Espeleo Clube, enquanto o da Lapa

do Beijo veio a ser concebido, também com o apoio fundamental do deste mesmo grupo, no ínterim desta pesquisa.

A metodologia utilizada no levantamento topográfico da Lapa do Beijo, foi a mesma empregada pelo grupo na ocasião da pesquisa na caverna Vargem da Lapa, no caso a British Cave Research (BRCA) 4C. Neste critério a mensuração dos ângulos azimutais e zenitais apresentam erro inferior a 2,5º, enquanto as leituras de distância devem exibir erros inferiores a meio metro. Nesta categoria também são realizadas seções transversais e longitudinais dos condutos das cavernas no intuito de expor importantes elementos geométricos e zonas deposicionais.

3.9.4 Materiais utilizados no levantamento

Nesta atividade o único equipamento topográfico utilizado foi um moderno dispositivo à laser, capaz de, simultaneamente, realizar leituras de distância e ângulos azimutais e zenitais.

Ainda na caverna, com base nestes dados mensurados, foi realizado um croqui do local em papel milimetrado, objetivando a dinamização do pós processamento em gabinete, em especial no que tange à questão das seções transversais.

3.10 Atividades de Laboratório

Uma vez coletados em campo, as amostras de solo foram encaminhadas aos Laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, onde foram submetidas à análises física e químicas.

3.10.1 Análises químicas

Nesta etapa foi realizada a análise química para fins de classificação, respeitando a metodologia proposta pelo Manual de métodos de análise de solo. EMBRAPA, (2011), salvo a matéria orgânica (M.O) que seguiu os parâmetros utilizados pelo Instituto Agronômico de Campinas

pH em água

pH em KCl 1 mol L^{-1}

Acidez potencial (H+Al) extração com acetato de cálcio e determinação por titulometria,

Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) extração com cloreto de potássio 1 mol L^{-1} e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica,

Alumínio (Al) extração com cloreto de potássio 1 mol L^{-1} e determinação por titulometria (Manual de métodos de análise de solo

Matéria orgânica (M.O.) determinação por titulação

Potássio (K) extração com Mehlich 1 e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica

Fósforo (P) extração com Mehlich 1 e determinação por colorimetria.

SB: Soma de bases trocáveis;

CTC: Capacidade de troca de cátions

V: Saturação da CTC por bases

m: Saturação por Alumínio.

3.10.2 Análises Físicas

A análise granulométrica foi realizada respeitando o Métodos: Buyoucos (densímetro), onde as classes são expostas em diâmetros (mm) conforme USDA. Na análise, foram extraídas cinco frações de areia, além do silte e argila, sendo que esta apresenta resultados em água e dispersa.

Areias:

Muito grossa = 2 a 1; grossa = 1 a 0,5; média = 0,5 a 0,25; fina = 0,25 a 0,10; muito fina = 0,10 a 0,05. O valor da soma das frações das areias, também é apresentado, no caso a Areia total = 2 a 0,05.

Silte = 0,05 a 0,002;

Argilas

Total = < 0,002;

Argila em água: determinada pelo método do densímetro, utilizando-se apenas água destilada para dispersão, sem qualquer dispersante químico.

3.11 Atividades de Gabinete

Tal fase da concepção metodológica, consiste na compilação dos dados acumulados nas etapas anteriores. Neste ponto foram desenvolvidas as análises finais como a elaboração de gráficos, tabelas e mapas, além da elaboração dos textos relativos à apreciação dos dados.

Os seguimentos metodológicos de gabinete mais específicos deste estudo, no caso relativos ao mapeamento das cavernas e processamento da imagens obtidas por RPA, serão expostos a seguir.

3.11.1 Cartografia Espeleológica

Todas as mensurações realizadas durante a etapa de topografia espeleológica foram inseridas no programa Compass Project Manager 5.1 que após processamento forneceu as projeções das poligonais e caminhamentos. Sequencialmente, com base nessas projeções e contando com o software de desenho vetorial bidimensional para design gráfico, corelDRAW, foram gerados os perímetros dos condutos das cavernas, gerando uma planta bidimensional da gruta, assim como as seções transversais para a obtenção dos perfis transversais da caverna.

3.11.2 Processamento de RPA

O processamento das imagens foi realizado em software especifico para a geração de modelos tridimensionais de prédios, objetos e estatuas que mais recentemente foi adaptado para o processamento de imagens oriundas de RPA´s.

Inicialmente são reconhecidas as coordenadas das centroides de cada imagem, em seguida com o auxílio de um algoritmo de busca baseado no SIFT, (Scale Invariant Feature Transform) são reconhecidos os pontos homólogos entre as imagens. Este processo é capaz tratar diversas imagens em um tempo diminuto, obviamente variável de acordo com a capacidade de processamento da máquina utilizada.

Uma vez os pontos fotogramétricos identificados é criada uma nuvem de pontos esparsas e em seguida com base na posição de cada câmera, é gerada a nuvem de pontos densa, onde se torna possível obter dados de profundidade, completando a nuvem esparsa.

Na última etapa os pontos da nuvem densa são conectados com o auxílio de algoritmos de triangulação, de modo a construir uma malha de diversos triângulos e assim gerar o Modelo Digital do Terreno.

3.11.3 Delimitação da Bacia

A delimitação da Bacia Poligonal da Vargem Lapa foi realizada no software ArcGIS após o desenvolvimento de um modelo digital de elevação do terreno que contemplava mais de 30 classes altimétricas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta parte do estudo serão trazidos à leitura os resultados obtidos no estudo os quais se apresentam distribuídos em acordo com os procedimentos técnicos utilizados visando uma facilitação de sua análise a apresentação.

3.12 Análise dos solos e depósitos

As tabelas com os resultados obtidos nas análises físicas e químicas se encontram no final deste volume (Anexos 4 e 5)

Além disso, é fundamental mencionar que durante a última etapa de campo foi observada a presença de uma equipe de sondagem em serviço à um empreendimento particular, realizando perfurações geotécnicas justamente para identificar a que profundidade que se encontrava a rocha sã.

Em conversa informal com o técnico responsável pelas atividades, foi transmitido que já haviam sido perfurados seis pontos em uma área inferior a 350m^2 e em ocasião alguma a rocha foi interceptada. Ainda segundo o profissional, em uma das oportunidades foram perfurados mais de 40 metros e sequer fragmentos de rocha, fosse ela metapelítica ou calcaria, foram encontrados. Na ocasião, também foram gentilmente permitidas a realização de imagens de alguns dos testemunhos recuperados na atividade (Fotos 6 e 7).

Foto 6: Caixa com testemunhos de sondagem

Foto 7: Detalhe de um dos testemunhos de sondagem

A análise das Imagens 6 e 7 indica que o material muito se assemelha ao observado na base do Perfil 1 e das tradagens 2 e 3 realizadas em posições da vertente similares em cota e declividade. No entanto, o fato dos testemunhos estarem apenas limitados à visualização e o toque, impossibilitou qualquer conclusão mais detalhada. Além disso o método de sondagem é extremamente agressivo às amostras, trazendo para a superfície um material submetido à considerável desgaste físico e passível de contaminação.

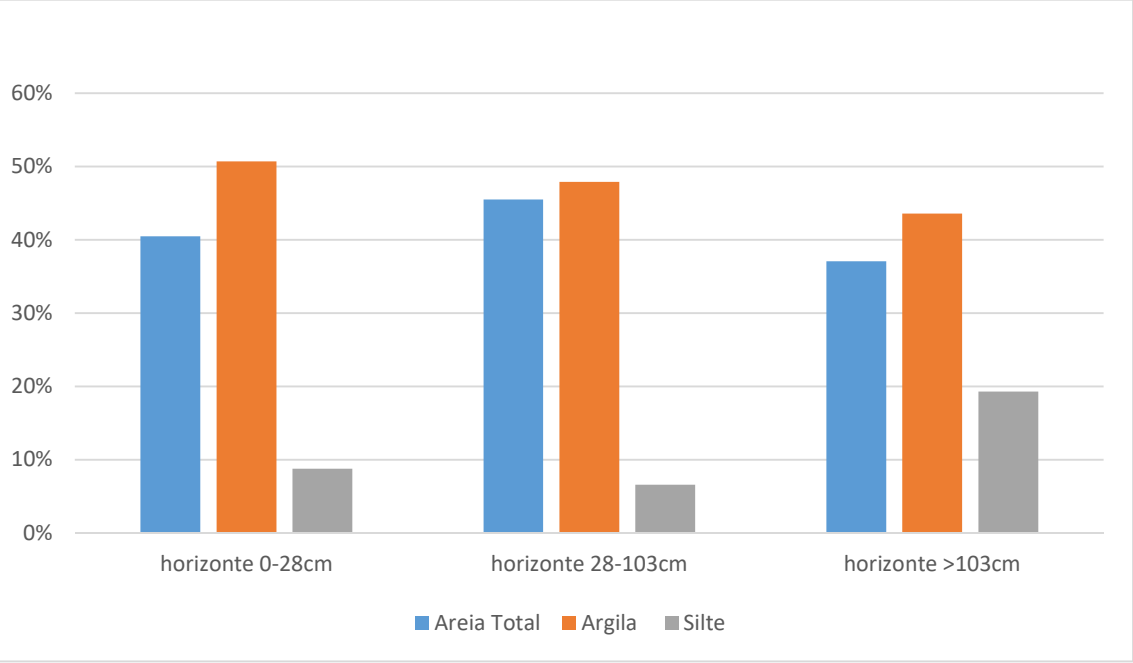
3.12.1 Análise Textural dos Perfis

Perfil 1

A análise textural do Perfil 1 (Gráfico 1) apresentou verticalmente uma breve diminuição na fração argila, partindo de 50.7% no horizonte 0-28cm, passando por 47.9% no seguinte de 28-103cm. No subsequente de 103-142cm. A fração silte apresenta valores baixos nos dois primeiros horizontes, sendo que sofre, até mesmo, uma breve redução no volume do primeiro para o segundo, (8.8% e 6.6%). No entanto, o volume da fração intermediaria aumenta significativamente com 19.3% no terceiro. No caso da areia ocorre um acréscimo entre os dois horizontes superiores, de 40.5% para 45.5%, seguido de uma redução de seu volume a 37,1% no terceiro.

O perfil apresentou pouco evoluído e muito pedregoso, com notória presença de cascalhos, sendo possível afirmar que não há uma tendência evolutiva no todo e salvo no horizonte 4 quando foi considerada como média argilosa, teve seus horizontes classificados como argilosos.

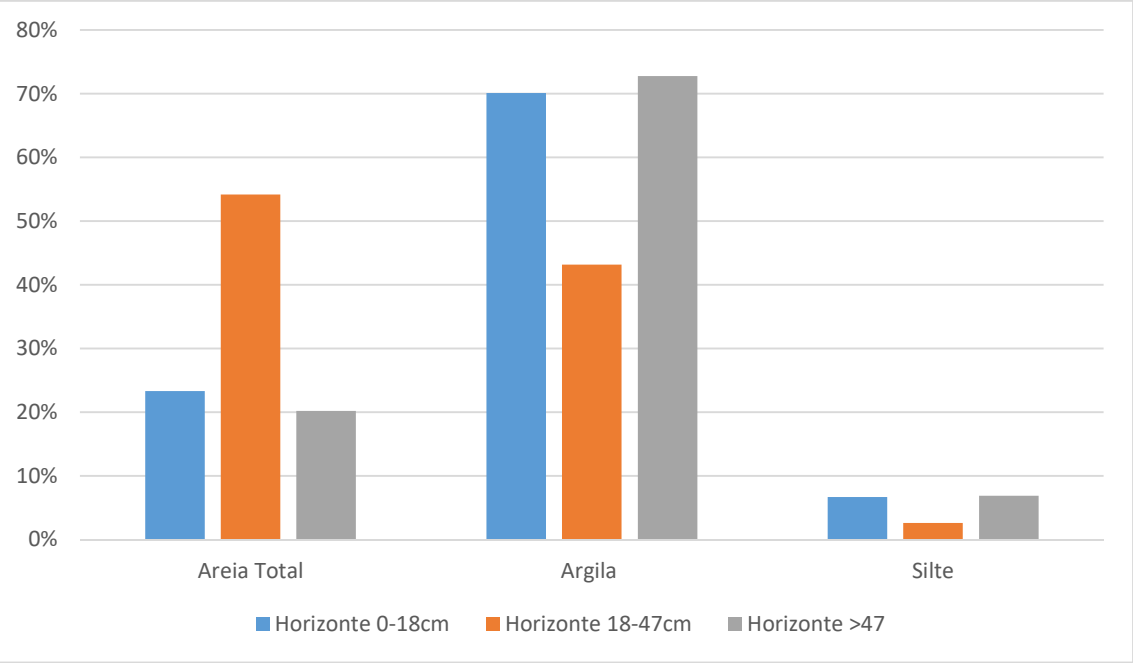
Gráfico 1: Frações areia, silte e argila (%) no Perfil 1



Perfil 2

No terço médio da vertente os valores da argila tiveram uma importante variação no horizonte intermediário. No caso, no primeiro 0-18cm era muito argiloso (70.1%) reduzindo significativamente no seguinte (18-47com) a 43.2% (argiloso) e voltando a ser muito argiloso no terceiro horizonte >47cm com volume de 72.8%. A fração silte teve valores modestos nas três ocasiões (6.7%, 2,6% e 6.9%). Situação que não foi observada na fração mais grossa, areia, quando é notável o aumento no horizonte intermediário, seguido de uma redução no valores, no caso, 23.3%, subindo a 54.2% e a redução a 20.2%. (Gráfico 2)

Gráfico 2: Frações areia total, silte e argila (%) no Perfil 2

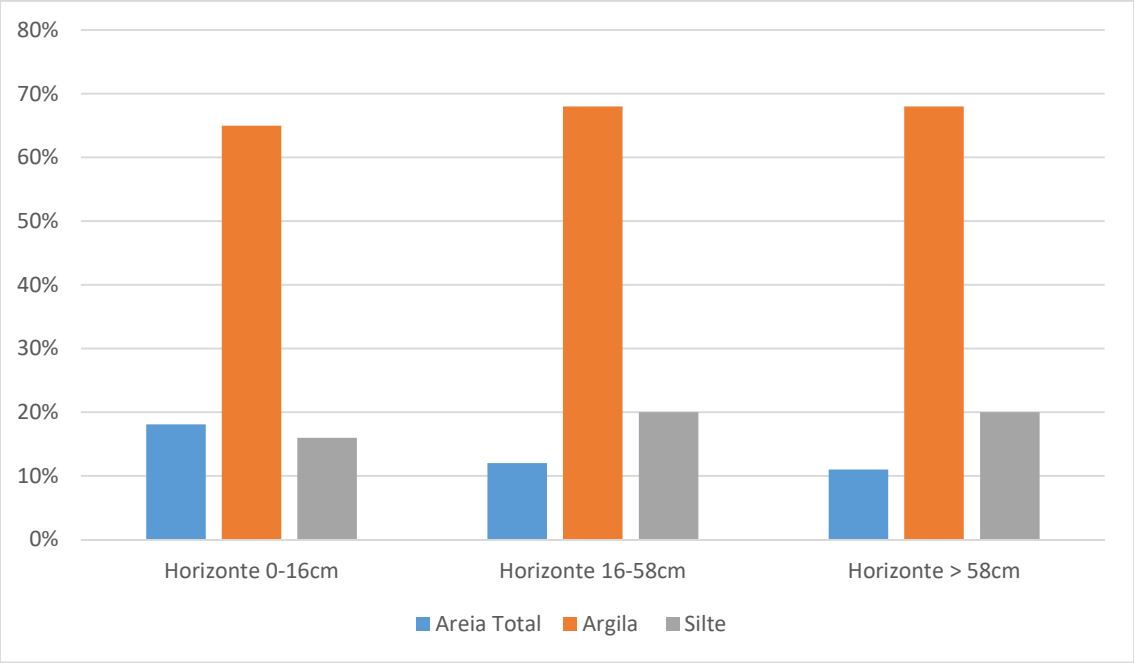


Este aumento atípico dos teores de areia, aliado a uma considerável redução no volume da argila, sugere a presença de um material coluvionar recoberto. É fundamental salientar que, salvo nos paredões do maciço calcário, este perfil foi realizado em uma posição da vertente onde há maior declividade dentro da bacia, 15%, que facilita o transporte de materiais mais grosseiros.

Perfil 3

Os três horizontes do terço inferior, 0-16cm, 16-58cm e >58, da vertente a fração argila apresenta-se alta tendendo a aumentar verticalmente, passando de 65.5% no horizonte superior, 67.8% no intermediário e 68.5% no inferior. A areia em contrapartida, segue tendência inversa, apontando uma redução mais relevante nos níveis superiores (18.1% a 11.9%) e mais sensível no último chegando a 11.3%. Por fim, o silte, em volume menor, mostra um breve aumento do primeiro para o segundo (16.4% e 20.3%) mantendo seu volume no basal (20.2%). (Gráfico 3)

Gráfico 3: Frações areia total, silte e argila (%) no Perfil 3

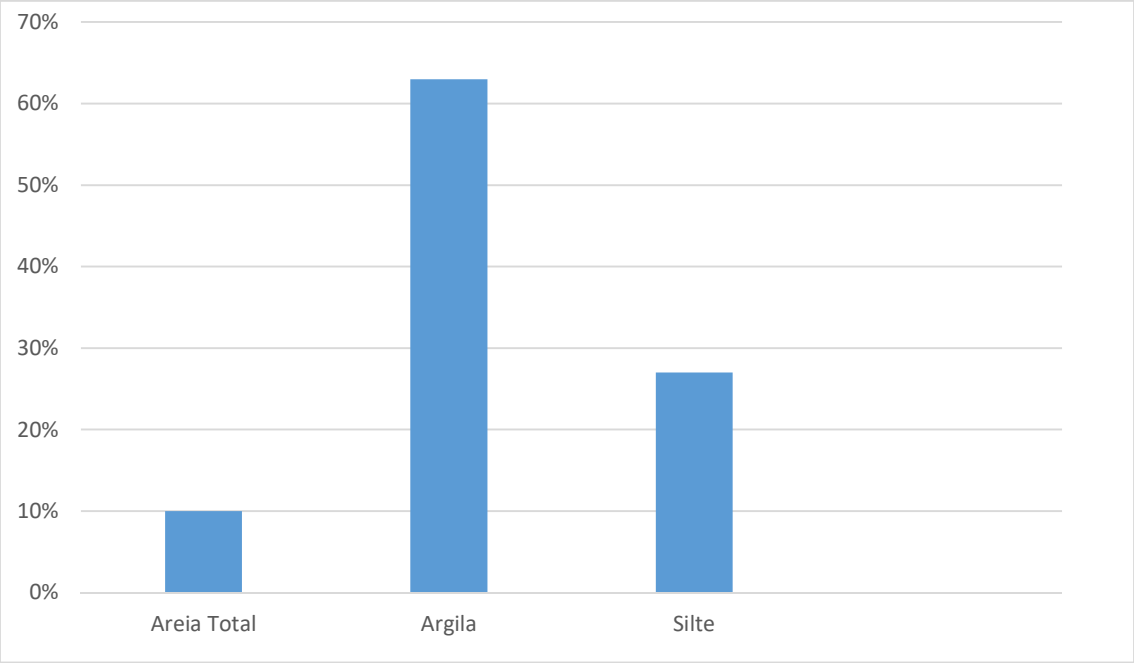


Outro detalhe que chamou a atenção já durante a escavação da trincheira, foi a inexistência de cascalhos. O grau de distinção entre os horizontes também é bem mais claro além de possuir maior uniformidade no aspecto textural quando os três horizontes foram tidos como muito argilosos

Greta de Contração

A amostra recolhida na superfície do piso da Lapa do Beijo mostrou características muito argilosa uma vez que essa fração teve 63%, silte de 27.3% e areia mais modesta a 9.7%. Ainda é importante atestar a ausência de frações mais grosseiras como cascalhos e calhaus. (Gráfico 4)

Gráfico 4: Frações areia total, silte e argila (%) na greta de superfície



3.12.2 Desenvolvimento Textural dos Horizontes

Baseado na caracterização bidimensional dos perfis de solo é possível, em um passo seguinte, propor uma distribuição espacial do arranjo dos horizontes montante abaixo, dando ao material móvel das vertentes uma identificação tridimensional. Essa abordagem recebe o nome de Análise Estrutural da Cobertura Pedológica.

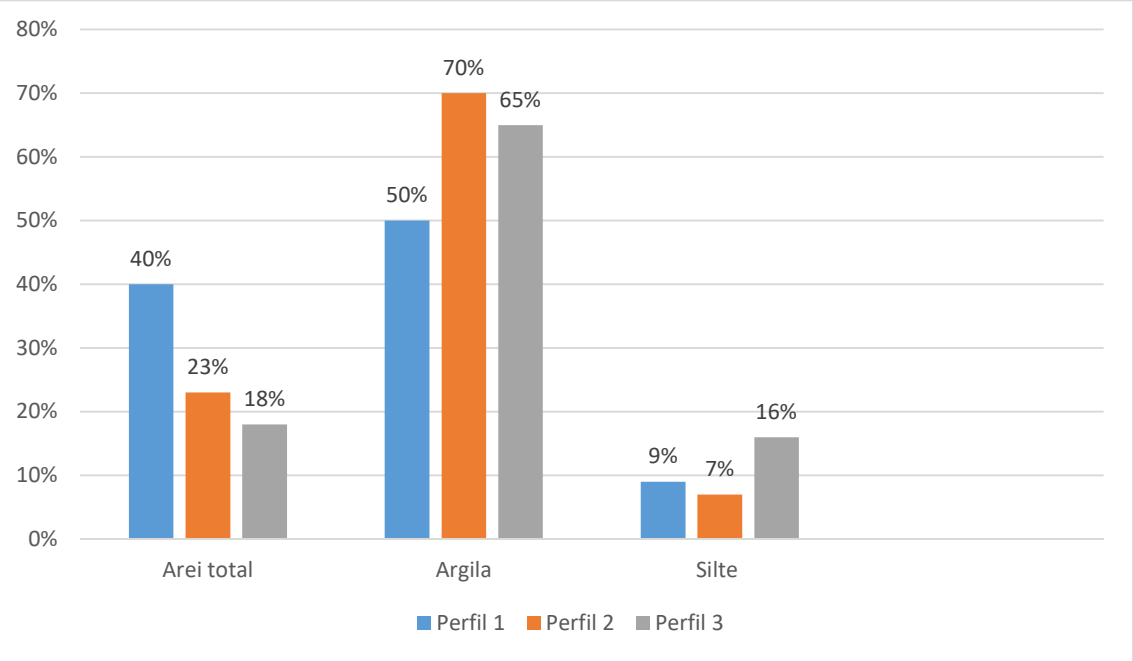
Nos perfis, os horizontes foram nomeados em acordo com sua espessura. Entretanto como, ao longo da vertente não estes tiveram sua espessura variando, de maneira que na etapa de avaliação lateral do horizontes, eles serão apenas numerados.

Horizonte 1

O horizonte mais relacionado à superfície apresentou apenas a classe arenosa como com uma tendência clara, no caso a diminuição gradual do entre em sentido à jusante. As outras duas frações, se comportaram de maneira inversa entre as tais. Onde a argila assume um pico de volume em meia encosta,

o silte apresenta seu menor teor, e na sequencia mais que dobra seu volume, enquanto a argila perde 5% de seu total. (Gráfico 5)

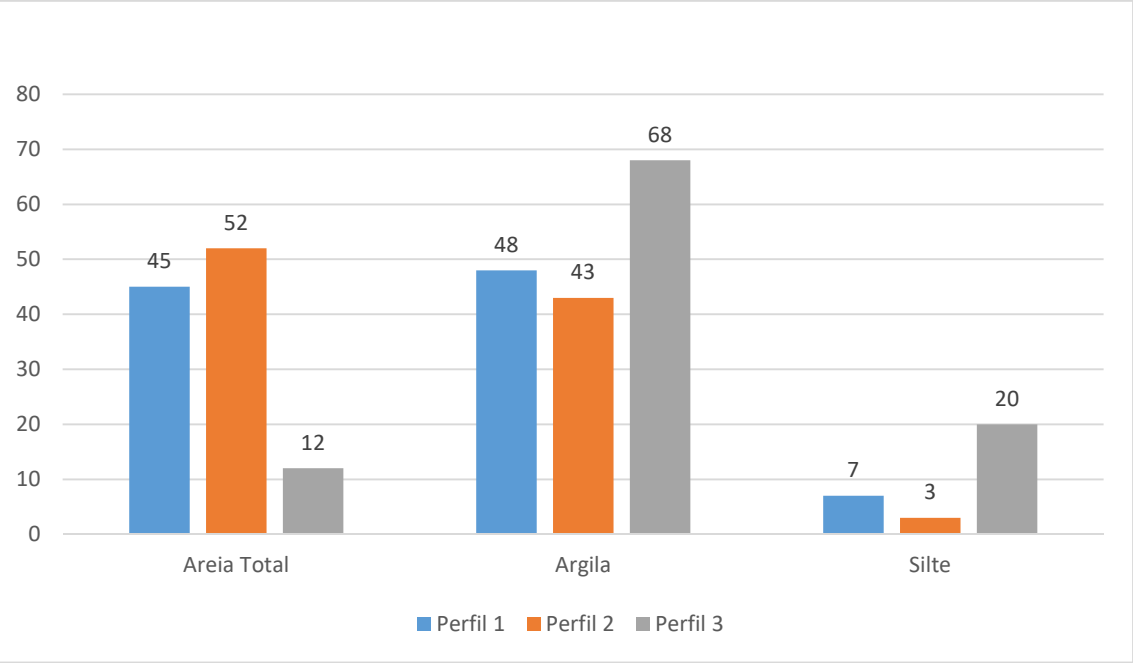
Gráfico 5: Frações areia total, silte e argila (%) no Horizonte 1



Horizonte 2

A contrário do horizonte superior, em 2 não há qualquer tendência de ganho ou perda de volume entre as frações vertente abaixo. No entanto a observação do Gráfico 6, que apenas a areia aponta um ganho volumétrico no perfil intermediário, seguida de uma significativa perda em sua massa na base da vertente (52 para 12%). Nessa situação o que ocorre é uma importante distribuição do volume para a argila e silte, o qual praticamente setuplica sua densidade às beiras da base.

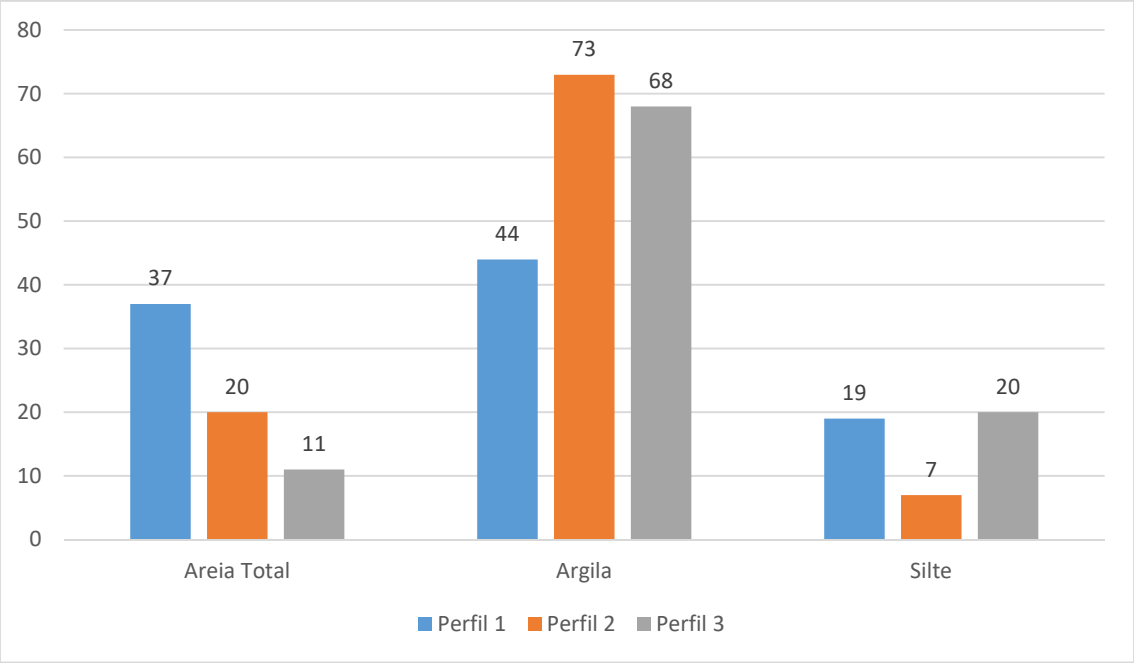
Gráfico 6: Frações areia total, silte e argila (%) no Horizonte 2



Horizonte 3

Neste horizonte, novamente é possível observar (Gráfico 7) uma tendência de diminuição nos percentuais de areia total entre os terços superior e inferior da vertente. Soma-se a isso, uma situação muito similar à vista no Horizonte 1 no que tange o comportamento das outras duas frações. No caso, em meia vertente, o pico de argila, corresponde ao menor volume de silte. Já na amostra seguinte, novamente a argila tem uma perda de 5% de sua densidade, enquanto o modesto valor de silte mais que dobra.

Gráfico 7: Frações areia total, silte e argila (%) no Horizonte 3



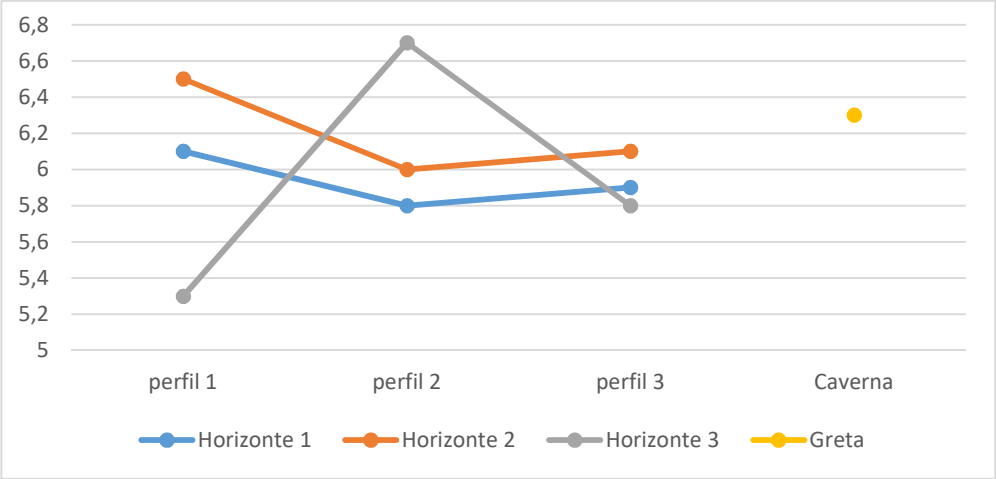
3.12.3 Análises Químicas

A análise dos parâmetros químicos tem como proposito compreender o comportamento de alguns elementos ao longo da vertente e suas eventuais implicações na evolução do modelado.

pH em H_2O

Em todas as ocasiões o pH em H_2O foram inferiores a 7. Em nove das onze amostras eles podem ser considerados solos moderadamente ácidos de acordo com o IBGE. Apenas em duas ocasiões foram constatados solos em classificação diferente quando no horizonte 103-142cm do perfil 1 foi apontado como fortemente ácido (5,3) enquanto no horizonte >47cm, se mostra como praticamente neutro (6,7). (Gráfico 8)

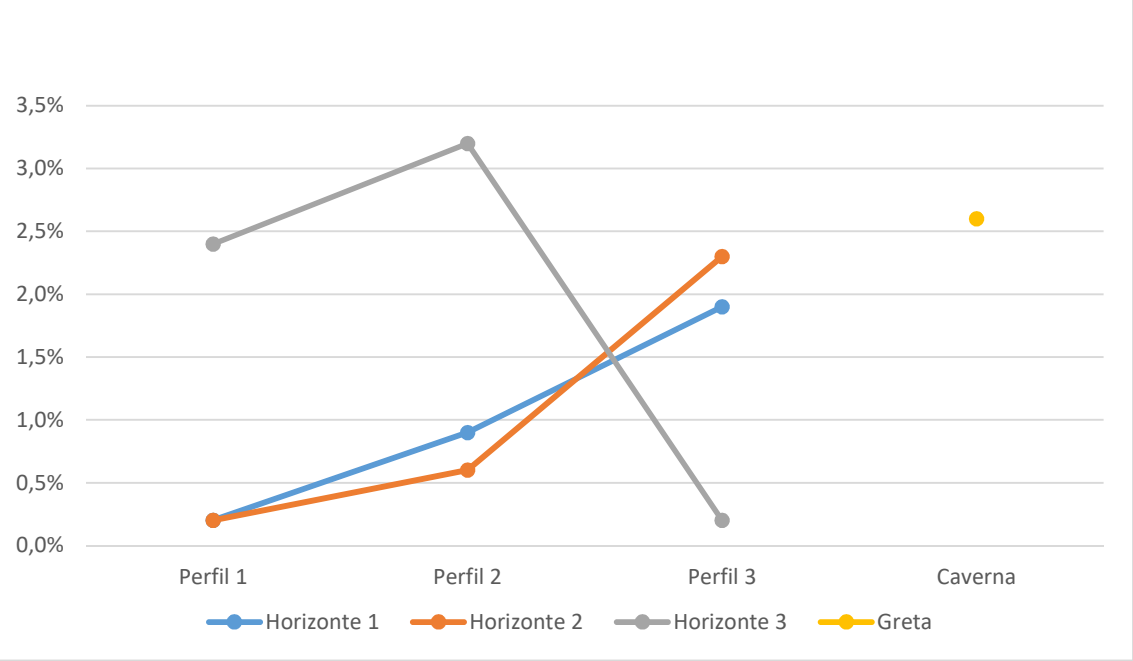
Gráfico 8: pH em H_2O



Matéria Orgânica

Os valores de matéria orgânica mantiveram-se discretos apresentando um aumento de acordo com a profundidade no Perfil 1 (Gráfico 9). Em superfície no horizonte 0-28cm, tal como no seguinte, 28-103, foram constatados modestos 0.2% de matéria orgânica. Já no horizonte abaixo o volume aumentou mais de 10 vezes, chegando a 2.4%, valor este mantido no horizonte seguinte. No perfil seguinte, 2, a presença de matéria orgânica ainda se mantem o volume baixa nos primeiros dois horizontes, sendo que até mesmo ocorre uma perda sutil, de 0.9% para 0.6% e assim como no Perfil 1, há um aumento na taxa no terceiro horizonte, alcançando 3,2% de índice. No Perfil 3 os teores de matéria orgânica mostram um breve aumento entre o horizonte 0-16cm (1.9%) e o 16-58cm (2.3%). No horizonte basal, o valor é reduzido em mais de dez vezes, indicando apenas 0.2% de matéria orgânica. Na amostra no interior da caverna, anotado o segundo maior índice entre todas as amostras analisadas com 2.6% de matéria orgânica.

Gráfico 9: Teor de Matéria Orgânica

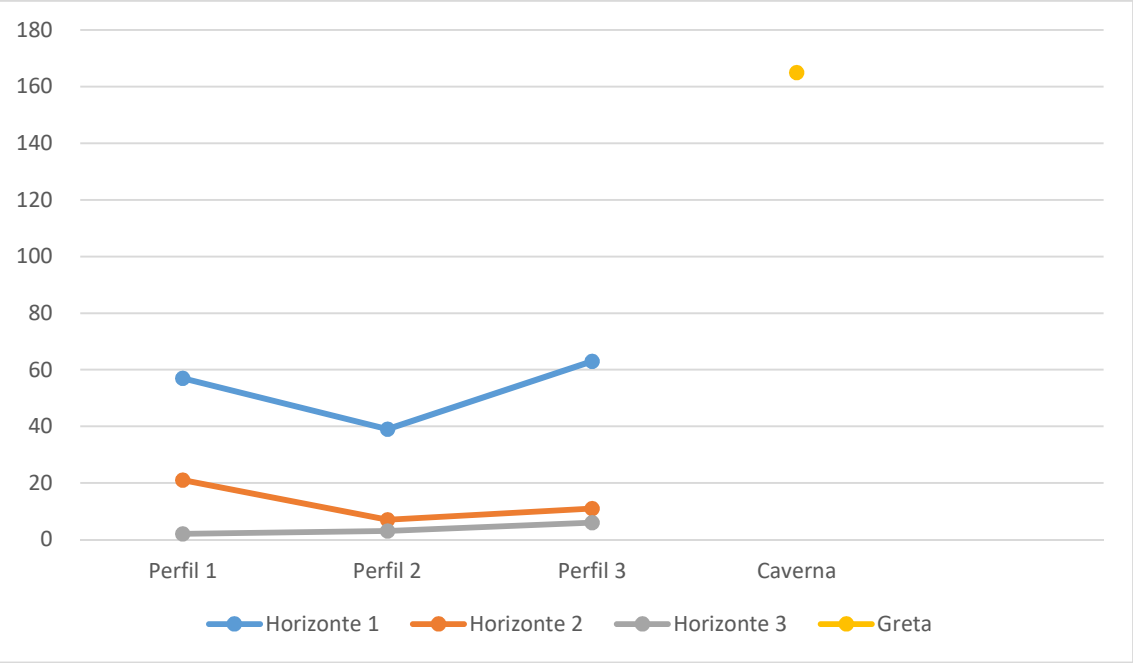


É possível sugerir que no desenvolvimento lateral dos solos, há um incremento discreto nos teores de matéria orgânica nos níveis superiores e intermediários. Nos níveis inferiores o teor aumenta do topo para a meia vertente e é fortemente reduzido na base da vertente. No interior da gruta, mesmo que em superfície, foi notado um valor mais elevado se comparado com as amostras dos horizontes mais altos do ambiente exocárstico.

Cálcio

Os teores de cálcio constados no Perfil 1 tiveram um valor relativamente alto em superfície mas sofrendo redução verticalmente, de 57, 21, 2 e 2 (mmolc.kg^{-1}) (Gráfico 10). Esta mesma tendência de redução vertical é observada no Perfil do terço médio onde foram observados os teores de 39, 7 e 3 (mmolc.kg^{-1}), assim como na base 63, 11 e 6 (mmolc.kg^{-1}). Na zona confinada da caverna, foi anotado o maior valor do elemento com índice de 165 (mmolc.kg^{-1}).

Gráfico 10: Teor de Cálcio (mmolc.kg·¹)

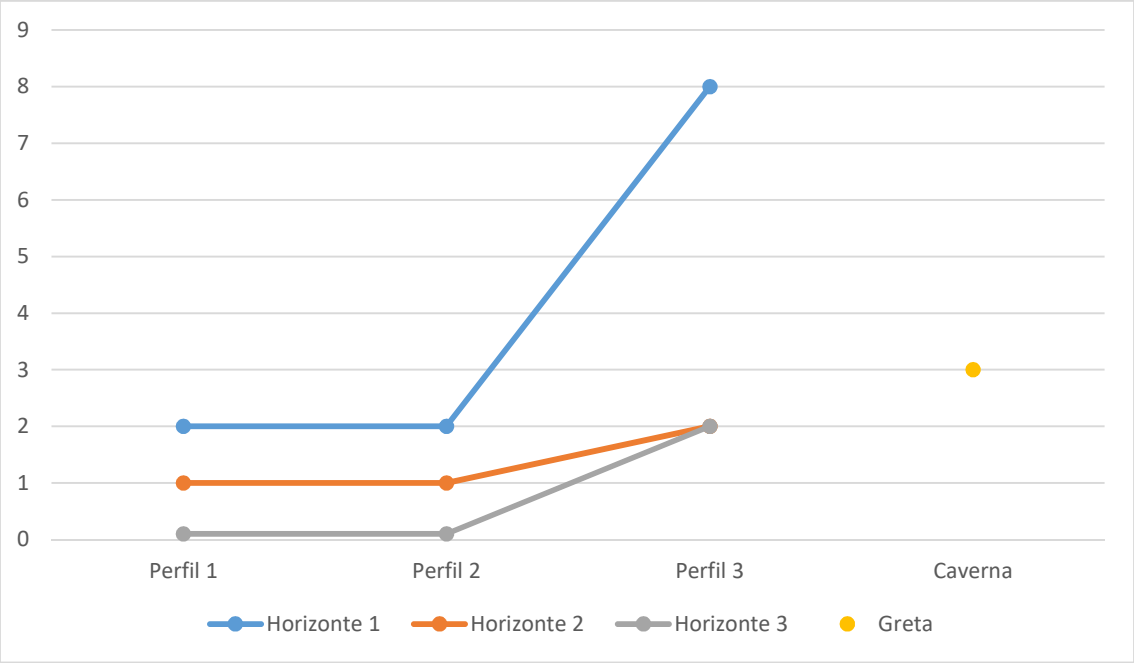


Lateralmente é possível notar que os valores de cálcio tendem a diminuir à meia vertente e voltar a ter valores maiores na base da vertente.

Magnésio

Os valores observados neste elemento, seguiram a mesma tendência de redução vertical apresentando os mesmo valores nos dois primeiros perfis, 2, 1 e <0,1 (mmolc.kg·¹) (Gráfico 11). Na base, novamente há um aumento neste elemento do complexo de adsorção mesmo que eles sigam baixos se comparados a outras bases 8, 2 e 2 (mmolc.kg·¹). No endocarste, a contrário do cálcio, foi contatado um teor de 3 (mmolc.kg·¹).

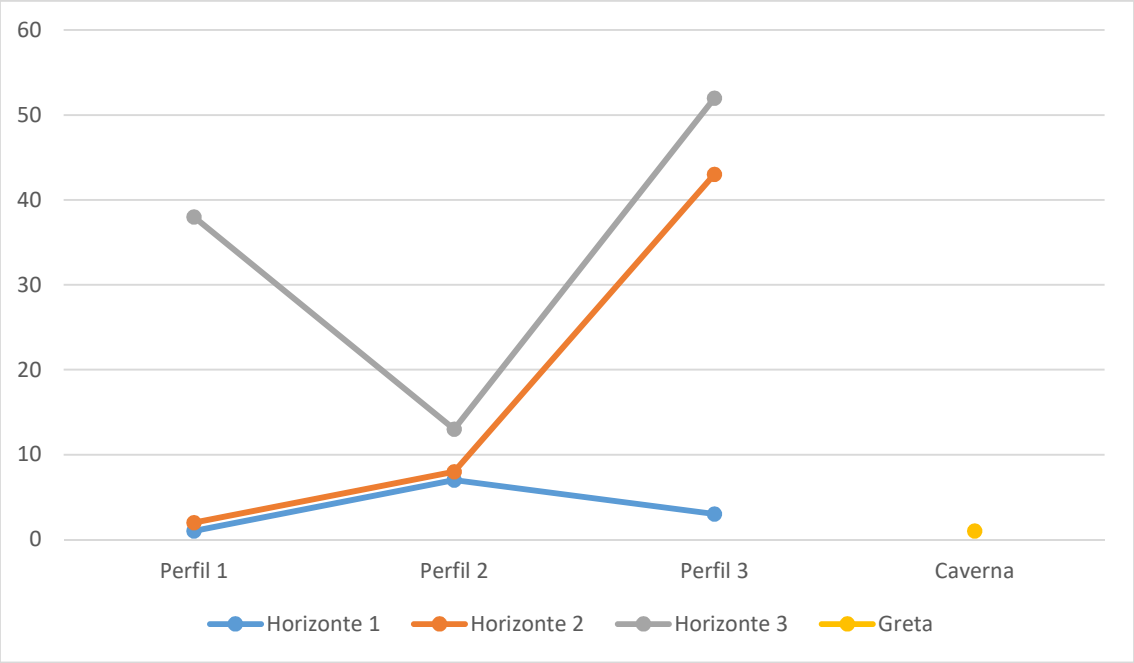
Gráfico 11: Teor de Magnésio (mmolc.kg•1)



Alumínio

No que tange o desenvolvimento vertical, os índices de alumínio, seguem a tendência oposta ao observado no Ca e Mg. Nesse elemento é, em todos os casos, observado o acréscimo em profundidade onde no Perfil 1 inicia-se com teor 1, passando para 2 e findando em 38 (mmolc.kg$^{\cdot 1}$), No perfil 2 parte de 7, aumentando para 8 e finalizando em 13 (mmolc.kg$^{\cdot 1}$) e no perfil mais à jusante. 3, 43 e 52 (mmolc.kg$^{\cdot 1}$). Já o teor na amostra da caverna, foi o mais baixo observado, 1 mmolc.kg$^{\cdot 1}$. (Gráfico 12).

Gráfico 12: Teor de Alumínio (mmolc.kg•1)

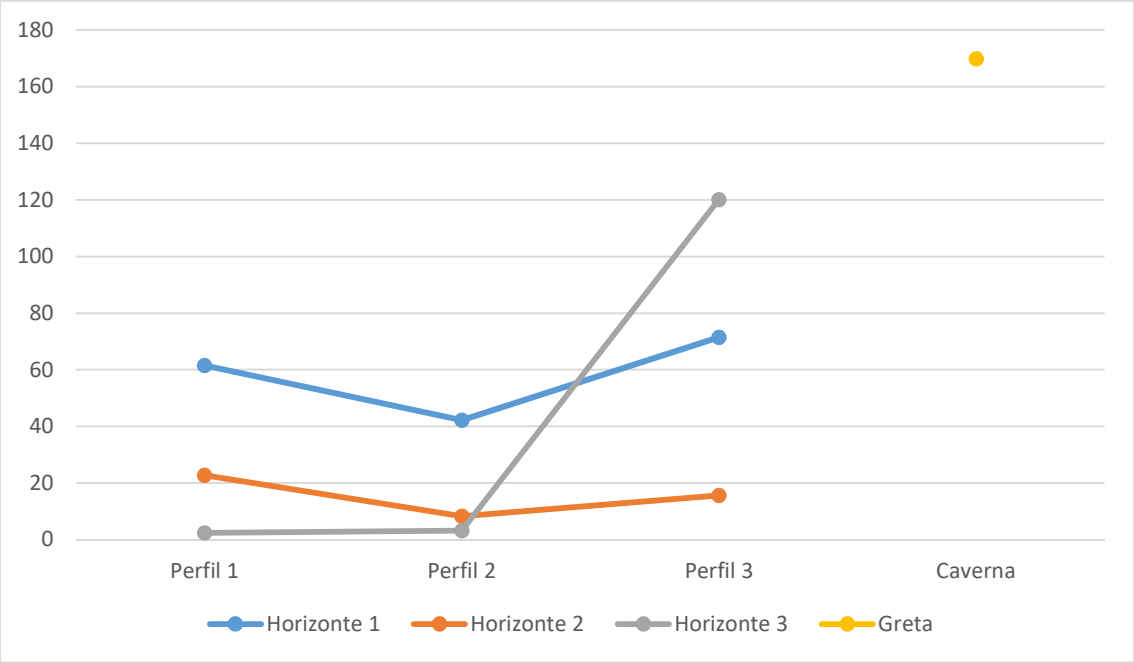


No desenvolvimento lateral eles não apresentam uma tendência como foi observado verticalmente uma vez que entre os horizontes superiores há um aumento seguido de uma queda, (1, 7 e 3 mmolc.kg$^{\cdot 1}$) no horizonte intermediário, um crescimento especialmente entre o material de meia e baixa vertente (2, 8 e 43 mmolc.kg$^{\cdot 1}$) e nos horizontes inferiores, uma condição antagônica ao superior (38, 13 e 52 mmolc.kg$^{\cdot 1}$).

Soma das Bases (SB)

Soma das Bases, diz respeito ao montante dos valores acima descritos. Verticalmente nos três perfis houveram notáveis reduções dos teores: no Perfil 1 61.5, 22.7 e 2.4 (mmolc.kg$^{\cdot 1}$); no Perfil 2, 42.2, 8.3 e 3.3 (mmolc.kg$^{\cdot 1}$); em 3, 71.3, 15.6 e 9.1 (mmolc.kg$^{\cdot 1}$). Dentro da gruta, foi apontado o maior valor da soma das bases, no caso 169,9 mmolc.kg$^{\cdot 1}$. (Gráfico 13)

Gráfico 13: Soma das Bases (mmolc.kg•1)

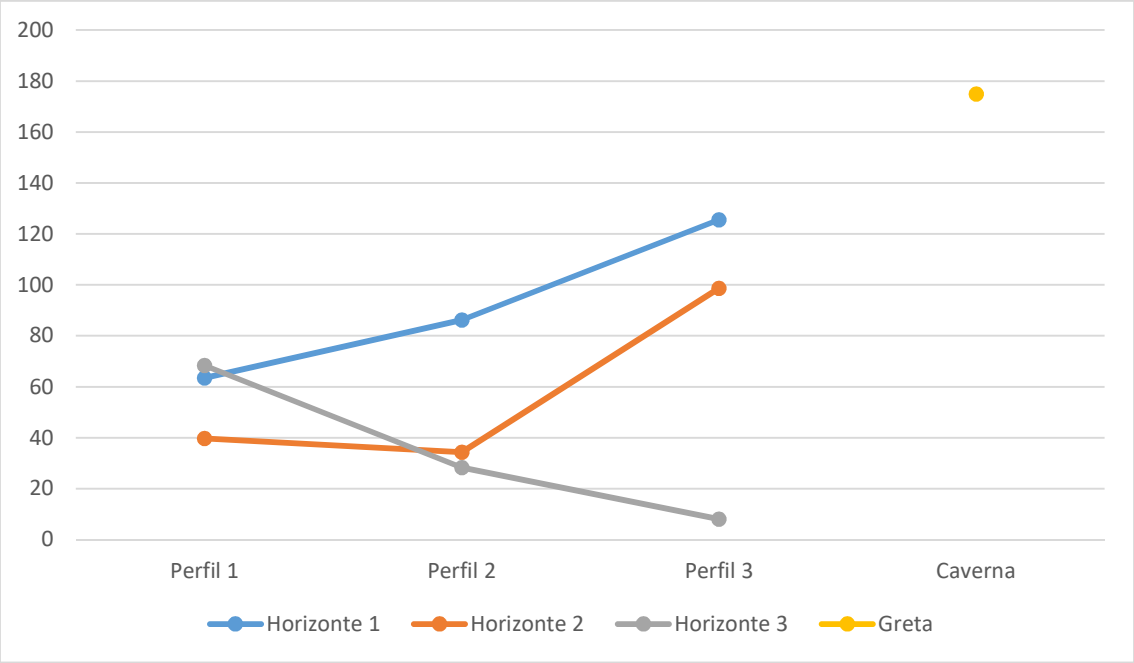


Já lateralmente estes números não seguem uma tendência nos dois primeiros horizontes onde no superior parte de 61.5, baixando para 42.2 e voltando a aumentar para 71.5, (mmolc.kg·^{1}) tal como no intermediário, onde parte 22.7, cai para 8.3 e aumenta para 15.6 (mmolc.kg·^{1}). Apenas no horizonte inferior, onde os valores são sempre menores, há um aumento nos teores, de 2.4, passando a 3.3 e terminando em 9.1 (mmolc.kg·^{1}).

Capacidade de Troca de Cátions (CTC)

A Capacidade de Troca de Cátions expressa a atividade da argila. Os valores no Perfil 1 variaram de 39.7 a 68.4 (mmolc.kg·^{1}) (Gráfico 14). Na superfície o valor é de 63.5, baixando para 39.7, voltando a aumentar pra 68.4. Os valores no Perfil 2 sofrem uma redução vertical, partindo de 86.2, passando por 34.3 e finalizando em 28.3. No Perfil 3, é repetida a tendência de redução, seguida de novo aumento no teor, 125.5, 98.6 e 120.1. A amostra da Lapa do Beijo, mais uma vez, apresentou maior valor no caso 174.9.

Gráfico 14: Capacidade de Troca de Cátions (mmolc.kg·^{1})



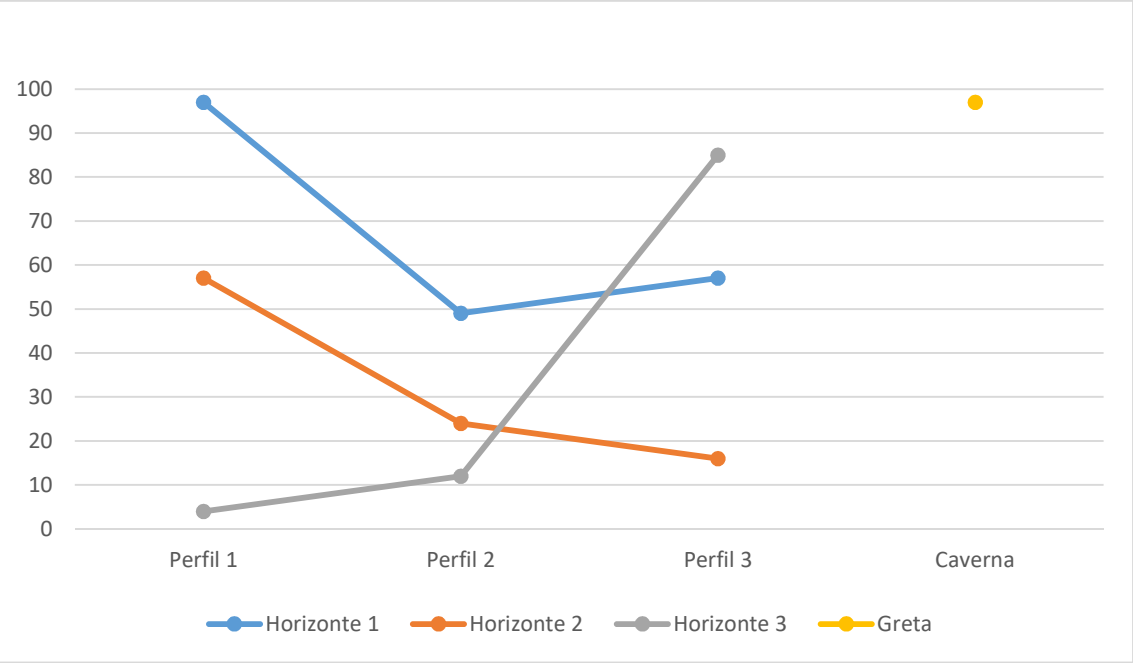
Observados lateralmente apenas nos horizontes superficiais há uma tendência de aumento nos valores da CTC, já nos subsequentes, é possível notar a propensão ao declino nos teores do Perfil 2, seguido de novo incremento no Perfil 3.

O aumento na CTC está intimamente relacionado ao aumento nos teores de argila e de Ca^{+2}, que tendem a ter maiores teores conforme se aproxima da base da bacia além de expressar seu maior valor no interior da Gruta.

Saturação em Bases (V)

O percentual de Saturação de Bases (V) reflete o grau de extensão no qual o complexo adsortivo do solo está preenchido com as bases. Verticalmente, todos os perfis apresentaram tendência de redução dos teores. Em 1 parte de 97, baixando para 57 até findar em 4%. No Perfil 2, superfície em 49, passando por 24 e base em 12%. Já no Perfil 3, 57, 16 e 8%. (Gráfico 15)

Gráfico 15: Saturação em Base (%)



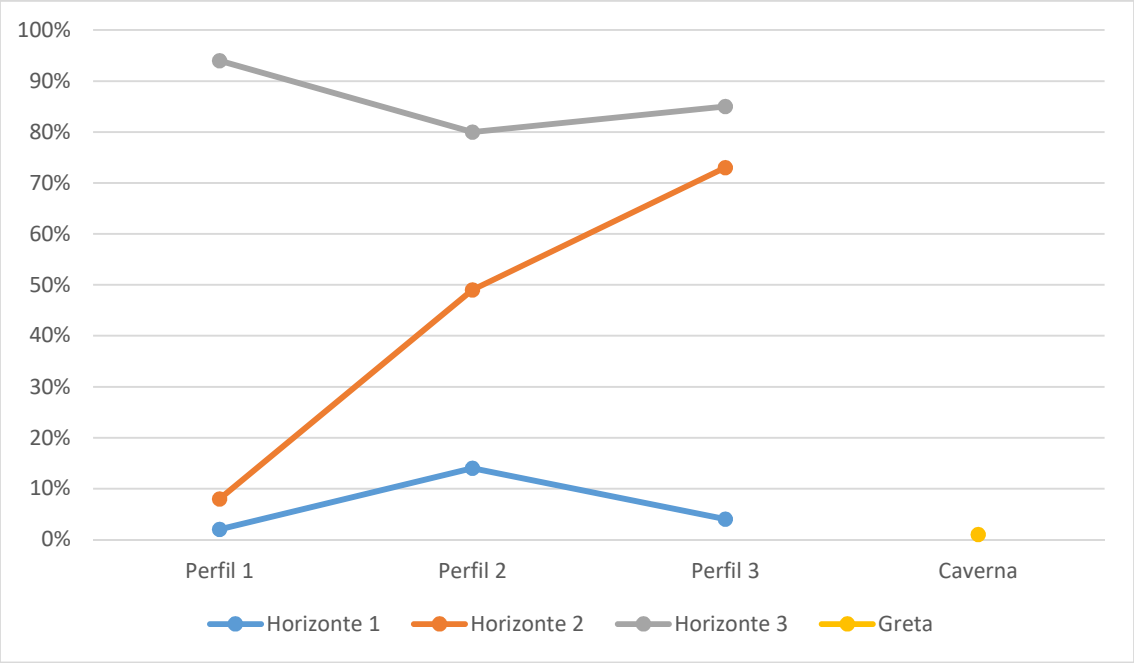
Mais uma vez, horizontalmente, não há uma tendência de aumento ou redução nos teores, apresentando uma relação com o observado na soma das bases e do Cálcio onde nos primeiros dois horizontes há a diminuição do Perfil 1 para o Perfil 2, seguido de novo aumento nos teores, enquanto que no horizonte inferior, a tendência e de um leve aumento na Saturação em Bases.

Seguindo esta tendência de maiores valores onde há maior valor como na soma das bases e Ca^{+2}, a amostra obtida na caverna apresentou a maori porcentagem, no caso 97%

Porcentagem de Saturação em Alumínio (m)

Nessa determinação é mensurado o grau de extensão onde o complexo adsortivo do solo está preenchido com alumínio. Mais uma vez, a propensão é de aumento dos valores em profundidade (Gráfico 16). No perfil 1, vai de 2 a 94, passando por 8 %. No segundo perfil seus valores percentuais são de 14, 49 e 80, enquanto que no perfil do terço inferior são de 4, 73 e 85%.

Gráfico 16: Porcentagem de Saturação em Alumínio (%)

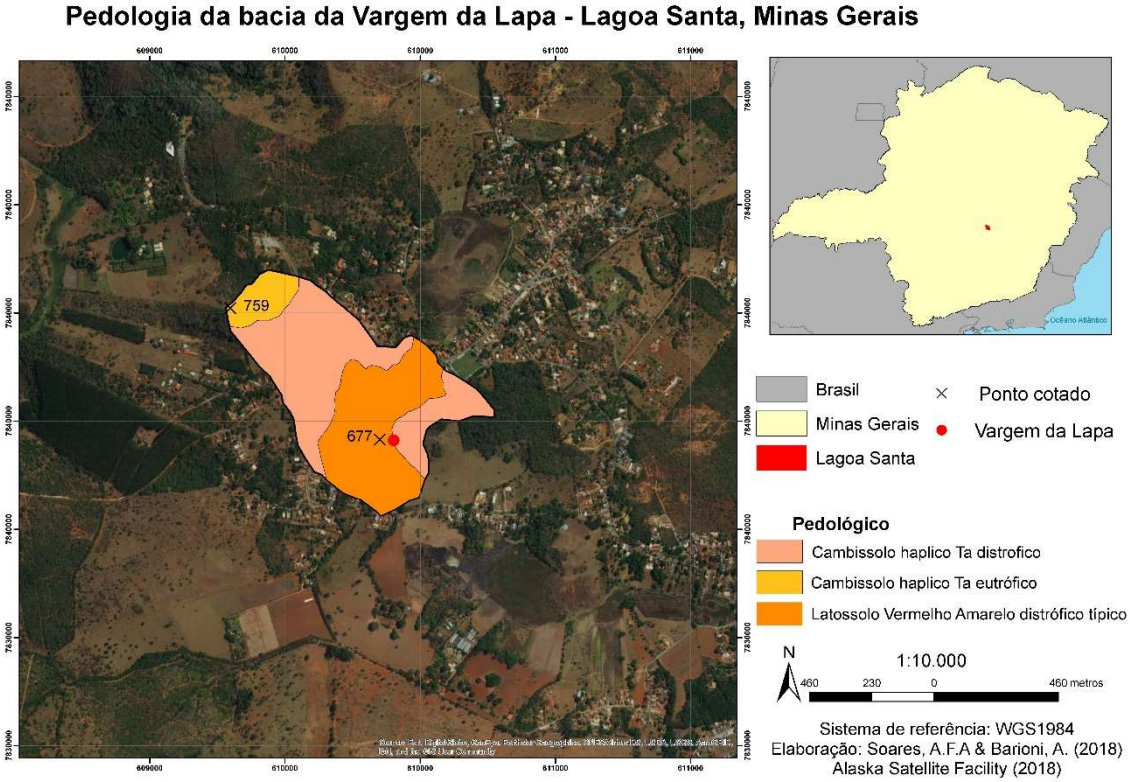


Lateralmente é possível afirmar que há situação inversa à observada na Porcentagem de Saturação de Bases. Neste caso, os maiores picos ocorrem onde havia os declínio da curva, caso dos horizontes superiores e inferiores. No caso dos horizontes intermediários ocorre a tendência de aumento da Saturação em Alumínio, oposto de condição de (V). A mesma condição foi observada na caverna, onde o teor da amostra foi de 1%.

3.12.4 Classificação do Solos da Bacia

Os três perfis de solo estudados se posicionam em diferentes compartimento geomorfológico (Figura 5) e de acordo com suas característica apontadas nas análises física e química foram classificados, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (CAMARGO et al., 1999), como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico no Perfil 1, Cambissolo Háplico Ta Distrófico no perfil de média vertente e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico na base da vertente. A classificação proposta no Relatório do Meio Físico da APA Carste de Lagoa Santa apontava a área da Bacia sem a classificação dos solos da área, expondo-a apenas como “área urbana”.

Figura 5: Pedologia da Bacia da Vargem da Lapa



Em um primeiro contato com a chão da parte mais interior e protegida da Lapa do Beijo, chama-se a atenção o fato de toda sua extensão estar colmatada por uma camada de argila com infindáveis gretas de contração e enormes sulcos que separam os blocos. Tal característica no material clástico, aliada a uma alta capacidade de troca catiônica das argilas (174,9 mmolc.kg^{-1}) é um indício da presença das argilas 2:1, situação essa que não deve estar ocorrendo ao menos nos dois perfis superiores da montante, no caso, a área fonte da amostra.

Esta transformação na argila do interior da caverna tende a estar relacionado ao o confinamento que o material está sendo submetido. Além disso, os altos teores de cálcio na amostra devem ser oriundos da transferência deste elemento, seja por gotejamento, ou mesmo migração *per ascensum* (via capilaridade) do cálcio para a superfície.

Um fato comum em cavernas, inclusive da região de Lagoa Santa (Auler, 1999) é a formação de calcretres em superfície. Tal ação se dá quando há a precipitação de carbonato de cálcio na superfície por mecanismos evaporativos via capilaridade, aliado à um pH mais alcalino e condições climáticas de baixa

umidade. No entanto, na trincheira escavada no interior da Lapa do Beijo, não foram observadas tais condições da calcita. Talvez isso se deva ao fato de que, embora a região esteja atravessando um período mais seco no holoceno, privilegiando processos de exumação do carste como um todo, a condição singular que as grutas da base da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa as colocam na contramão da maioria das cavernas do Carste de Lagoa Santa, propiciando o confinamento hidráulico mesmo raramente aflorante, e assim, inviabilizando a precipitação da calcita na superfície de seus condutos.

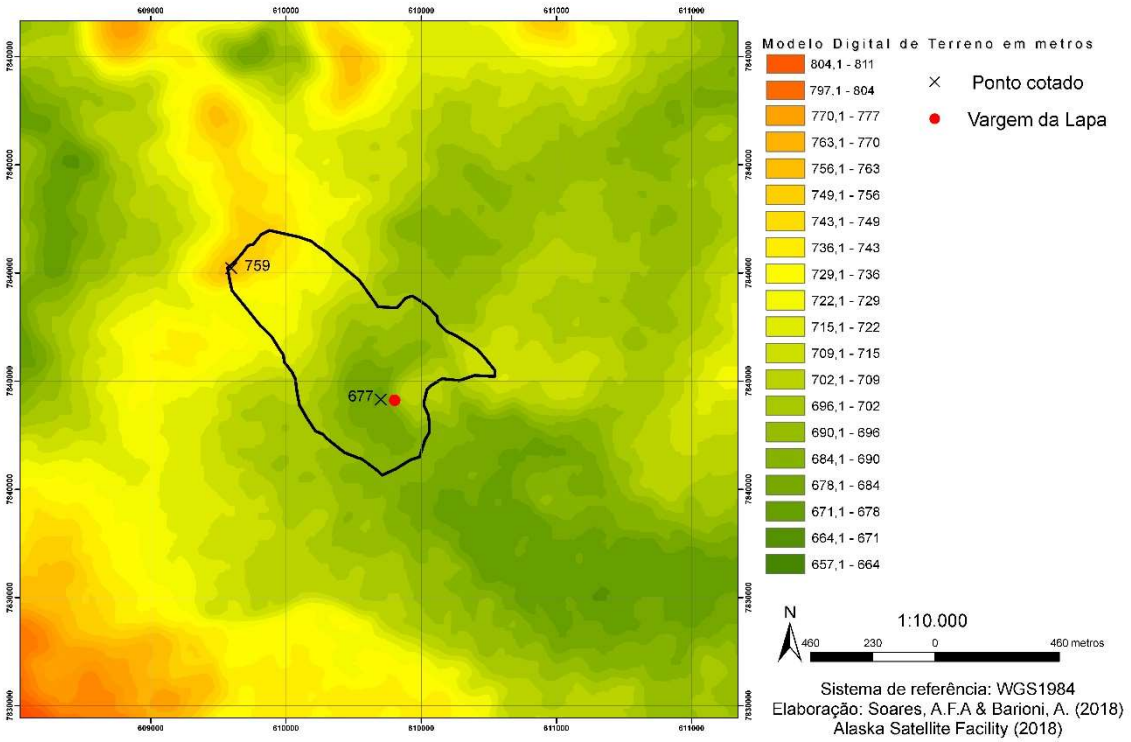
3.13 Geomorfologia da bacia poligonal da Vargem da Lapa

3.13.1 Exocarste

A bacia poligonal da Vargem da Lapa, se desenvolve em uma área de 42,5 hectares, não apresenta cursos fluviais perenes significativos e seus sumidouros, a Vargem da Lapa e Lapa do Beijo, apresentam saturação hídrica apenas em períodos de grande precipitação meteorológica. De acordo com de moradores da região, nos últimos oito anos não foi observado o afloramento do lençol freático em momento algum (informação pessoal).

A bacia poligonal da Vargem da Lapa, é caracterizada no setor noroeste, por interflúvios elevados de morros de topos convexos de cotas ultrapassando os 750m e se encontra deprimida entre as lagoas da Lapinha (Figura 6) à norte e Sangradouro a sul. Já na base da bacia é observado uma planície formada por colúvio constituído por material clástico de base plana e cota de 677m, verificada na entrada de seus sumidouros. A leste do maciço se encontra a única dolina do recorte, exibindo modestas dimensões de não mais que 25 metros de diâmetro e 5 de profundidade e recoberta por uma vegetação estacional semidecidual

Figura 6: Área da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa



A declividade de suas vertentes são baixas, inferiores a 10% em raras situações chegando a 15% e as encostas não sofrem consideráveis rupturas no relevo, salvo na transição para o compartimento inferior onde no fundo da depressão deposição do material transportado ocorre de maneira planiforme (Foto 8). A avaliação dos ortomosaicos bem como os frequentes controles de campo, não apontaram feições erosivas como ravinamentos ou voçorocas, sendo possível sugerir que todo o material transportado pelo endocarste é fruto do processo da erosão laminar.

Foto 8: Detalhe da vertente e sua declividade pouco acentuada

3.13.2 Epicarste

Talvez por seu desenvolvimento recente, o relevo epicárstico da bacia é pouco evoluído se comparado à outros compartimentos geomorfológicos do Carste de Lagoa Santa, como por exemplo no planalto das dolinas, ou mesmo na vizinha Lapinha, onde as vertentes rugosas se destacam na paisagem, assim como torres residuais e lapiás de proporções métricas.

Na bacia, se destacaram a grande quantidade de *rain pits*, além das *kamenitza* (marmitas de dissolução) e lapiás de juntas cobertas (Fotos 9 e 10)

Foto 9: Lapiás e kamenitza observados no topo do maciço da área de estudo

Foto 10: Rain Pits observados em rocha aflorante na entrada da Vargem da Lapa

3.13.3 Endocarste

Nas paredes e tetos do sistema subterrâneo frequentemente são observados depósitos terrígenos e brechas encrustados em níveis superiores, estando eles consolidados, ou não. Uma característica destes materiais é a visível discordância deles com o observado no piso atual da caverna. As relíquias destes, que outrora foram o piso das cavernas, não apresentam seleção granulométrica tão alta como na atual, sendo possível visualizar blocos e calhaus e até mesmo fósseis de fauna (Fotos 11 e 12), sugerindo um paleoclima com muito mais energia para o transporte de sedimentos.

As cavernas não tem como características a exuberância de seus espeleotemas se comparadas com outras do Carste de Lagoa Santa. De maneira geral, apresentam poucas colunas, estactites, estalagmites ou travertinos, sendo mais frequentes os escorrimentos de calcita misturados a material terrígeno enroupando alguns pontos de suas paredes e os coraloides do tipo couve flor. Merece destaque um salão localizado no final da Lapa do Beijo, poucos metros acima do piso atual da gruta, onde a parede encontra-se totalmente coberta por uma admirável camada de calcita extremamente pura e clara.

Foto 11: Material clástico consolidado no teto da caverna Vargem da Lapa

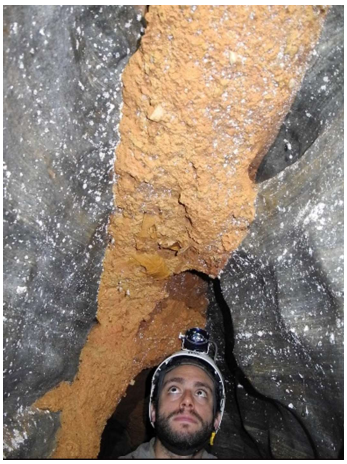


Foto 12: Fosseis de fauna (paca) no teto da Vargem da Lapa

Outro fato geomorfológico observado nas paredes que corrobora com a suposição de um ambiente pretérito mais enérgico, são as marcas de corrente (*scallops*) (Foto 13), que são feições de dissolução em formato conchoidal, podendo também ocorrer espeleotemas (Bretz, 1942). O tamanho dos *scallops* está relacionado com a velocidade da água que atravessa o sistema, onde as maiores representam velocidades mais altas e turbulentas, enquanto a situação antagônica, um ambiente de menor energia na circulação da água.

Foto 13: Piso da caverna totalmente colmatado por sedimentos, situação que ocorre em todo seu desenvolvimento e paredes com scallops de vários tamanhos, indicando diversas fases do fluxo d'água.

Transversalmente os condutos de ambas as cavernas também apresentam as características típicas da região de formato triangular, resultado da atuação do sedimento como elemento de defesa da rocha perante a erosão

química causada pela água na rocha calcária. Tal feição pode ser observada nas seções transversais expostas do mapa da Vargem da Lapa (Anexo 4)

Observada em planta baixa (Anexo 4) a Vargem da Lapa e Lapa do Beijo apresenta o padronagem reticular, típica do carste de Lagoa Santa, indicando um importante controle estrutural em sua morfologia. Seus condutos não são muito alargados e se apresentam colmatados por sedimentos clásticos em cota igual ao da área externa a caverna (Foto 13), na base da Depressão Poligonal da qual é o sumidouro.

Dessa maneira, é possível sugerir que anteriormente a erosão do maciço, ambas as cavernas deviam se conectar no que hoje, é a base da depressão. Além disso, a observação empírica da fechamento dos condutos através da interceptação dos condutos por depósitos terrígenos, aliado a leitura do produto cartográfico das cavernas, sugere a possibilidade de que ligações entre seus condutos, atualmente estejam soterradas por sedimentos argilosos carreados para o interior deste sistema, cessando o transporte mais ativo rumo ao nível de base local, o Rio das Velhas.

3.14 Remotely Piloted Aircraf

O produto gráfico fornecido pelo RPA se mostrou uma importante ferramenta para a observação de fenômenos e ações morfológicas que possam estar sucedendo na área. O tamanho de pixel extremamente pequeno, serviu para uma melhor compreensão da paisagem da bacia. Para o voo a 75 metros de altura, o apresentou tamanho de 13,3 cm, ao passo que uma imagem do satélite World View 3, que atualmente oferece a melhor resolução, entrega um pixel de 31cm, além de ser muito mais onerosa. Já em softwares livres como Google Earth, raramente o pixel apresenta menos de 1 metro de dimensão. Soma-se a isso baixo erro posicional dos três eixos da aeronave, os quais totalizados foram de 3,52m, que poderia ser ainda menor caso na área sobrevoada, houvessem pontos de controle de sistemas de GPS de precisão.

Outro artificio conveniente que o RPA fornece, é a possibilidade de sobrepor o produto da interpolação das imagens no software Google Earth,

favorecendo a melhor compreensão do ambiente e de fatos geomorfológicos (Fotos 14 e 15).

Foto 14: Imagem do maciço rochoso feita com RPA

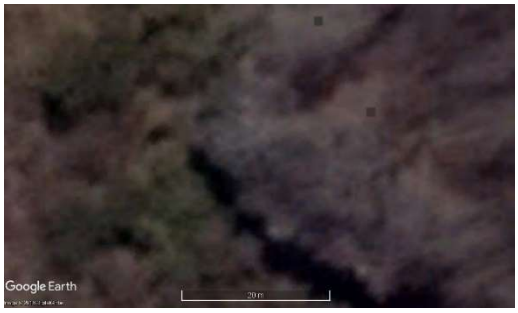


Foto 15: Imagem disponível no Google Earth

No entanto este sistema se mostra limitado para a geração de Modelos Digitais de Terreno, visto que é apenas um sistema de captação de imagens e não de rastreamento da superfície, por meio de bandas espectrais. O processo de digitalização do relevo se mostrou extremamente complexo e não tão prático, uma vez que o sistema de digitalização, não reconhece autonomamente elementos não referentes ao relevo, como vegetação, construções ou mesmo uma simples superfície de uma lagoa, classificando-os como parte das vertentes. Dessa maneira, o produto final tende a não apresentar concordância a morfologia do terreno, salvo se o usuário despender enorme quantidade de tempo para corrigir os erros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Confirmando o apresentado anteriormente, (SHIZATO 1998, PILÓ 1998) em qualquer posição do relevo, as características do material móvel não indicam pedogênese baseada no material calcário. Entretanto nas posições mais à jusante da bacia, (Perfil 3) ocorre o significativo aumento do teor de Ca^{++} especialmente no Horizonte mais superficial, (0-28cm). Tal fator pode ser atribuído às cheias que circunstancialmente acometem a bacia, como por exemplo a que acometeu a região no ano de 1949 quando, segundo informações orais, a altura da água atingiu mais de seis metros em relação ao nível de base local.

A definição exata dos limites da bacia, não se mostrou uma tarefa das mais simples, uma vez que seu entorno ocorre uma significativa presença de pequenos pontos de absorção da água sem significativas alterações altimétricas, especialmente a sul, onde se encontra o sistema da Lagoa do Sangrador. Esta definição seria improvável sem frequentes controles de campo aliados ao uso de diversos instrumentos, fossem eles mais simples como as cartas topográficas 1:50000, ou mais modernos como as imagens obtidas por RPA.

Se comparados à demais posições do epicarste e endocarste da Região de Lagoa Santa, a morfologia destas zonas na bacia, indicam um desenvolvimento mais recente da paisagem. A ausência de significativos elementos típicos do relevo cárstico na área, como por exemplo a presença de uma única e pequena dolina, ou mesmo suas duas cavernas sem grandes salões, blocos oriundos da incasão, ou mesmo espeleotemas de maior exuberância, corroboram com esse conceito.

Refletindo acerca da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica e o solo como um agente modelador do relevo, é possível afirmar que na atual circunstância climática a concentração de argila de alta atividade nos setores inferiores da bacia, aliada a um material móvel não tão rico partículas agregadoras, como constatados nos cambissolos dos terços superior e médio

das vertentes, faz com que modelado tenda a regredir de maneira mais acelerada caso não haja um controle do uso da cobertura pedológica.

Mesmo não sendo constatados quaisquer tipos de feições erosivas no material pedológico da Bacia Poligonal da Vargem da Lapa, a constituição textural do depósito terrígeno de superfície da Lapa do Beijo pode ser avaliado como um indicativo de que processos erosivos possam estar sucedendo à montante da caverna

No que se refere a questão dos limites das Áreas de Influência Direta e Indireta de uma caverna, este estudo mostra que não é possível utilizar de uma distância euclidiana para abalizar as tais. É licito afirmar que, no caso das Lapas da Vargem e do Beijo, absolutamente toda bacia é sua área de influência direta e dessa forma, toda sua bacia deve estar sujeita à políticas de zoneamento que busquem a preservação do sistema cavernícola.

Dessa forma é possível sugerir que, cabe ao poder público um refinamento das políticas especificas acerca da utilização do solo em áreas cársticas, especialmente no que tange a parcela da manipulação do material pedológico, não se limitando apenas ao tópico, não menos importante, da hidrologia.

Este estudo está abreviado a apenas uma pequena fração de incontáveis metodologias que podem ser aplicadas para uma melhor compreensão do processo evolutivo do conjunto solo-relevo não apenas nesta bacia, mas podendo extrapola-lo não apenas para o Carste de Lagoa Santa, sendo possível sugerir da pesquisa lançando mão dos seguinte meios:

- Mineralogia de argilas para compreender se estas estão se transformando durante seu transporte pela vertente, assim como, verificar se elas estão se reorganizando no ambiente de estagnação da caverna
- Analisar das mais distintas maneiras os materiais clásticos encrostados nos tetos e paredes das cavernas Vargem da Lapa e do Beijo procurando atestar como condições climáticas pretéritas agiram na formação do relevo local.

- Utilizar de métodos de datação como isótopos de cosmogênico e luminescência oticamente estimulada buscando melhor compreender I: taxas de deposição no interior das cavernas e assim, relacioná-las com o uso e ocupação do solo na Bacia. II: compreender a magnitude temporal dos processos de erosão e deposição no endocarste e suas possíveis relações com o rebaixamento do nível de base local.
- Realizar pesquisa utilizando dos mesmo métodos desta em outras depressões poligonais no Carste de Lagoa Santa que apresentem situação morfológica similar à da Vargem da Lapa, porém dentro de Unidades de Conservação, objetivando comparações entre os resultados.
- Utilização constante de Remotely Piloted Aircraf no intuito de monitorar a possíveis deflagrações de processos erosivos no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB´SABER, A. 1977. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul, por ocasião dos períodos glaciais Quaternários. Paleoclima, São Paulo, DG/USP, n.3, p.1 -19

ALMEIDA, F. F. M. (1977) O Cráton de São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo. 7(4): 349-346.

ANTONY, D. M, GRANGER, D. E. 2007. A New Chronology for the Age of Appalachian Erosional Surfaces Determined by Cosmogenic Niclides in Cave Sediments. Earth Surface Processes and Ladforms, v. 32, p 874 – 877.

ARDAU, F. BALIA, R. BIANCO, M. WAELE, J. 2007. Assessment of cover-collapse sinkholes in SW Sardinia (Italy). Geological Society of London, p 47-57.

AULER, A. S. & BASÍLIO, M. S. 1988. Geologia da região a leste de Santana do Riacho com ênfase ao estudo das feições cársticas. Monografia de Graduação. Belo Horizonte: Instituto de Geociências da UFMG. 80p.

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

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

AULER, A.S., SMART, P.L., WANG, X., PILÓ, L.B., EDWARDS, R.L., CHENG, H., 2009. Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance. Geomorphology 106, 142‑153

BALÁZS, D. 1984. Paleocarste tropical exumado na região de Lapinha (Minas Gerais, Brasil. Karszt és Barlang, v.II, p.87-92. Tradução de Paulo Rónai).

BAKALOWICZ, M. 1992. Géomie des eaux et flux de matières dissolutes. Karstologia, n.2 (Mémoires), p. 61-74.

BARBOSA, G. V. 1961. Notícia sobre o Karst na mata de Pains. Boletim Mineiro de Geografia, Belo Horizonte, n.2 e 3, p.3-21.

BÖGLI, A. 1960. Solution of limestone and karren formation. In: SWEETING, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorpholy. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchemark Papers in Geology / n.59. 12p

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

BOULET, R., HUMBEL. F.X., & LUCAS, Y. 1982. Analyse struturale et cartographie en pédologie: II Une méthode d'analyse prenante en compte l'organisation tridimensionnele de la couverture. III passage de la phase analytique à une catrographie générale synthetique. Cah. ORSTOM, Ser. Pédol. XIX-4, p. 323-351.

BRETZ, J. H. 1942. Vadose and Phreatic Features of Limestones Caverns. Journal of Geology 50. p 675 – 811.

BRANDT, W. 1988. Espeleologia aplicada aos estudos de impacto ambiental. In: Congresso de Espeleologia da América Latina e Caribe, 1, 1988, Belo Horizonte. Anais…Belo Horizonte: UNICOP. p. 197-207.

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

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

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

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

BULL, P. A.; DAOXIAN, Y.; MENGYU, H. 1989. Cave sediments from Chuan Shan Tower Karst, Guilin, China. Cave Science, v. 16, p. 51-56.

BURMEISTER, H. 1980 (edição) Viagem ao Brasil através das províncias do Rio de Janeiro e Minas Gerais. São Paulo: Edusp. 372p.

CABRAL, J. A. L. (1994) Cartografia geotécnica de planejamento da região de Sete Lagoas-Lagoa Santa. In: Projeto VIDA, CPRM, Belo Horizonte. Relatório Técnico

CIRIC, M. 1967. Caracteristics of soil formation on limestone and principles of limestone classification. Soviet Soil Science. S/N, p. 57-64.

CORBEL, J. 1959. Erosion en terrain calcaire. Ann. Geog. 68, p. 97-120.

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

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. 1994. Belo Horizonte: Informações Básicas para a gestão territorial: região de Sete Lagoas – Lagoa Santa.

CRUZ JUNIOR, F. W. da. 1998. Aspectos geomorfológicos e geoespeleologia do carste da região de Iraquara, Centro-Norte da Chapada Diamantina, Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 108p.

CUNHA, A, A. (org). 2016. Controle de qualidade de posicionamento de ortofoto gerada pelo RPA (*Remotely Piloted AircraftI*) Phantom 3 com receptor GNSS embarcado. 12º Congresso de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial.

CVIJIC, J. 1893. The dolines. In: SWEETING, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorpholy. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchemark Papers in Geology / 59. p. 19-37.

CVIJIC, J. 1918. Hygrographie souterraine et evolution morphologique du karst, Recueil des Travaux de l'Inst. De Geogr. Alpine. V.6, p.375-426.

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

DRAYBRODT, W. 1990. The role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers in limestones: a model simulation of karst elovuiton. Journal Of Geology, v. 89 n.5, p. 639-655.

ELLWOOD, B. B, GOSE, W. A. 2006. Heinrich H1 and 8200 yr BP climate events recorded in Hall´s Cave, Texas. Geology, v, 34, p 753 – 756.

EMBRAPA. 1999. Sistema brasileiro de classificação dos solos. Rio de Janeiro, 412p.

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

FENG, T. CHEN, T. POLYAKOV, V. O. WANG, K. ZHANG, X. ZHANG, W. 2016. Soil Erosion Rates in Two Karst Peak-cluster Depression Basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with ^{137}Cs measurements. Geomorphology 253. p 217 – 224.

FORD, D. C.; EWERS, R. O. 1978. The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. Canadian Journal of Earth Science, v.15, p. 1783-1798.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. 1989. Karst geomorphology and hydrology. London, Unwin Hyman. 601p.

FORD, T. D. 1975. Sediments in caves. Transactions British Cave Research Association, v. 2, n. 1. p. 44-46.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTÍSTICA. 1992. Mapa da Vegetação do Brasil. 1: 5.000.000

GAMS, I. 1973. Types of Accelerated Corrosion. In: SWEETING, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorpholy. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchemark Papers in Geology / 59. p 126-133.

GAMS, I. 1978. The polje: The problem of definition. Zeits. Geomorph. n.22, p. 170-181.

GAMS, I. NICOD, J. JULIAN, M. ANTHONY, E. SAURO, U 1993. Environmental Change and Human Impacts on the Mediterranean Karsts of France, Italy and the Diraric Regions. Cremlingen. Catena Supplement 25. p 59 – 98.

GOLDIE, H.S 1993. Human Impact on Karst in the British Isles. Cremlingen. Catena Supplement 25. p 161 - 185

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

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

GUTIERREZ F, COOPER A.H, JOHNSON K.S 2008. Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. Environmental Geology 53:1007–1022

GROSSI, J. H. & QUADE, H. (1985) Revisão estratigráfica do Grupo Bambuí (bloco oriental), em Minas Gerais, Anais do 3º Simp. Geol. Minas Gerais, Belo Horizonte. ABG, p. 68-83

GRUND, A. 1914. The geographical cicle in the Karst. Zeitschr. Ges. Erdkunde. 52: 621-640. In: SWEETING, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorpholy. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchemark Papers in Geology / 59. 429 p.

HADDAD-MARTIM, P. M (org). 2017. Quaternary depositional facies in cave entrances and their relation to landscape evolution: The example of Cuvieri Cave, Eastern Brazil. Catena, v, 157, p 372 – 387.

HARDWICK, P. GUNN, J. 1993. The Impact of Agriculture on Limestones Caves. Cremlingen. Catena Supplement 25. p 235 – 249.

HERAS, R. (org.). 1972. Manual de hidrologia: princípios básicos em hidrologia - v.1. Madrid: Escuela de Hidrologia. 473p.

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

JOURNAUX, A. 1977. Geomorphologie et Préhistoire. Methedologie pour une Cartographie de L'Environnement dês sites Préhistoriques; L'Example de Lagoa Santa (Minas Gerais, Brésil). Norois, v. 95, p. 319-335.

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

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

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

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

LAMOUROUX, M. 1972. Étude de sols formes sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. Thèse Sc., Strasbourg et. Mém. ORSTOM, n. 56, 266p.

LANARI, C.U. 1909. Ossadas humanas fósseis encontradas numa caverna calcarea das vizinhanças do Mocambeiro. Annaes da Escola de Minas, Ouro Preto, n. 11, p. 15-35.

LAUREANO, F. V. 1998. O registro sedimentar clástico associado aos sistemas de cavernas Lapa Doce e Torrinha, Município de Iraquara – Chapada Diamantina, BA, Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.

LAUREANO, F. V. 2014. Idade de soterramento 26Al/10Be em grão de quartzo e o assoreamento dos sistemas de caverna na região de Iraquara (BA): 2 milhões de anos de registro sedimentar quaternário. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.

LAURITSEN, S. E.; LAURITSEN, A. 1995. Differential diagnosis of paragenetic and vadose canyons. Cave and Karst Science, v. 22, p, 23-30.

LEHMANN, H. 1936. Morpohological Studies in Java. In: SWEETING, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorpholy. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchemark Papers in Geology / 59. p. 320-328.

LEMOS, R. C. & SANTOS, R. D. 1996. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3ª ed. SBCS. Campinas. 84p.

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

MAIRE, R.; QUINIF, Y. 1988. Chronostratigraphie et evolution sedimentaire en mileu alpin das la Galerie Aranzadi (Gouffre de la Pierre Saint Martin, Pyrenees, France) Annáles de la Société Géologique de Belgique. v. 111, n.1, p. 61-77.

MALTA, I. M. 1995. Dinâmica e evolução do sistema cárstico da Lapa Vermelha de Pedro Leopoldo, MG. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Depto de Geografia – Universidade de São Paulo. 77p.

MARTONNE, E. de. 1909. Traité de géographie physique. Paris: A. Colin. 3 tomes.

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

MOURA, V.; AULER, A. S.; LEÃO, M.; ALT, L. 2013. Photographic and sediment monitoring procedures and initial results for a brazilian iron ore cave. 20º National Cave and Karst Management Symposium. Carlsbad.

NEVES, W.A; ARAUJO, A.G.M; BERNARDO, D.V; KIPNIS R.; FEATHERS, J,K. 2012 Rock Art at the Pleistocene/Holocene Boundary in Eastern South America. PLoS ONE 7(2): e32228. doi:10.1371/journal.pone.0032228

NICOD, J. 1972. Pays et paysages du calcaire. 1. Ed. Paris: Presses Universitaires de France (La Géographe, 7) 244p.

NICOD J, JULIAN M, ANTHONY E (1997) A historical review of man-karst relationships: miscellaneous uses of karst and their impact. Rivista di Geografia Italiana 103, p 289–338

NIMER, E & BRANDÃO, A.M.P.M. 1989. Balanço hídrico e clima da região dos cerrados. 1. Ed. Rio de Janeiro. FIBGE.166p.

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

PALMER, A. N. 1984. Geomorphic interpretation of Karst features. In: LAFLEUR, R.G. Groundwater as a Geomorphic Agent. Allen & Unwin, 8, p. 173-209

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

PANNO, S. V, CURRY, B. B, WANG, H. HACKLEY, K. C, LIU, C. L, LUNDSTORM, C, ZHOU, J. 2004. Climate Change in Southern Illinois, USA, Based on the age and $\delta^{13}C$ of Organic Matter in Cave Sedments. Quaternary, v.61, p 301 – 313.

PARIZZI, M. G. 1993. A gênese e a dinâmica da Lagoa Santa com base em estudos palinológicos, geomorfológicos e geológicos de sua bacia. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. 60p.

PARISE, M., DEWAELE, J., GUTIÉRREZ, F., 2009. Current perspective on the environmental impacts and hazards in karst. Environmental Geology. 58, 235–237.

PEREIRA, R. G. F de A. 1998. Caracterização geomorfológica e geoespeleológica do carste da bacia do rio Uma, borda leste da Chapada Diamantina (município de Itaetê, estado da Bahia). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.

PESSOA, P.F. 1996. Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG: potencialidades e riscos. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências da USP. 101p.

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

PILÓ, L. B. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú – Carste de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado. Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

PRICKNETT, R.G., BRAY, L.G., STENNER, R.D 1976. The chemistry of cave Waters. In: FORD, D. & CULLINGFORD (eds). The Science of Speleology, London, Academic Press, p. 213-266.

PROUS, A. 1991. Aspectos arqueológicos de Lagoa Santa. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 3, 1991, Belo Horizonte. Roteiro de Excursão. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG. Pp.39-42.

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

RENAULT, P. 1968. Contribuition al'etude actions méceniques et sédimentologiques dans la spéléogenése. Annales de Spéléologie, v. 23, n.3, p. 575-593.

RENAULT, P. 1992. La karstologie Francaise de 1900 à 1992. Karstologia (Mémoires), n. 2, p 17-30.

RIBEIRO, C.M. 1994. O clima do planalto de Lagoa Santa. Belo Horizonte. Estudos ambientais e propostas de manejo na região de Lagoa Santa – MG. Fundep. 28p.

RODET, J. 1997. As zonas cársticas de São Raimundo Nonato (Piauí, Brasil). O Carste, Belo Horizonte, v.9 n.1, p. 2-7

ROGLIC, J. 1972. Historical Review of Morphologic Concepts. In, SWEETING, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorpholy. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchemark Papers in Geology / 59. p 12-22.

SALVATI, R. SASOWSKY, I. D. 2002. Development of colapse sinkholes in áreas of groundwater discharge. Journal of Hydrology, v, 264, p 1 – 11.

SANDERS, E. M. 1921. The cycle of erosion in a Karst Region (after Cvijic). Geog. Rev. N.11. p 593-604.

SANTOS, R.D., LEMOS, R.C., SANTOS, H.G., KER, J.C., ANJOS, L.H.C., 2005. Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo. SBCS, Viçosa.

SASOWSKY, I. D.; WHITE, W. B.; SCHMIDT, V. 1985. A. Determination of stream-incision rate in the Appalachian plateus by using cave-sediment maganetostratigraphy. Geology, v. 23, n. 4, p. 415-118.

SCHMIDT, V. A. 1982. Magnetoestratigraphy of sediments in Mamoth Cave, Kentucky. Science, v. 217, p. 827-829.

SCHMIDT, V. A.; JENNINGS, J. N.; HAOSHENG, B. 1984. Dating of cave sediments at Wee Jasper, New South Wales, by magnetostratigraphy. Australian Journal of Earth Science, v. 31, p. 361-370.

SCHOELL, W.U. (1973) Sedimentologia der Bambui - Gruppe in SE teil des São Francisco Beckens, Forsh. Geol. Palaent., 31/32: 71-91

SCHROEDER, J.; FORD, D. C. 1983. Clastic sediments in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada. Artic and Alpine Research, v. 15, n. 4, p 451-461.

SILVA, A. B., MOREIRA, C. V. R. & AULER, A. S. 1987. Estudo da Dinâmica dos recursos hídricos da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Belo Horizonte. 32p.

SILVA, A. B. da., COSTA. P. C. G. CAVANELLAS, E.A.P.P., SANTOS, A.P. & BONVINCINI, D.A. 1998. Abatimento de solo na cidade de Sete Lagoas. CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Belo Horizonte. 13p.

SHINZATO, E. 1998. O Carste Da Área De Proteção Ambiental De Lagoa Santa (Mg) D Sua Influência Da Formação Dos Solos. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos de Goytacazes

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

STRAUSS, A. M. 2008. Ocupação Humana no Início no Holoceno às Margens de uma Lagoa Cárstica na Região de Lagoa Santa – MG. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.

STRAUSS, A.M. (Ed). 2015. The oldest case of decapitation in the New World (Lapa do Santo, east-central Brazil). Plos ONE 10(9): E0137456. Doi:10.1371/Journal.Pone.0137456

STRAUS, A.M. (Ed). 2016. Early Holocene ritual complexity in South America: the archaeological record of Lapa do Santo (east-central Brazil). Antiquity Publications Ltd. Cambridge, p. 1454-1473.

SWEETING, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorpholy. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchemark Papers in Geology / 59. 429 p.

TRICART, J. & CAILLEUX, A. 1955. Introduction à la geomorphologie climatique. C.D.U. 222p.

TRICART, J. 1956. O karst das vizinhanças setentrionais de Belo Horizonte (Minas Geais). Revista Brasileira de Geografia, Rio de Janeiro, n. 4, p.3-20.

TRICART, J. 1965. Principes et méthodes de la géomorphologie. Paris: Masson. 496p.

TRUDGILL, S. T. INKPEN, R. 1993. Impacto f Acid Rain on Karst Environments. Cremlingen. Catena Supplement 25. p 199 – 218.

TULLER, M. P.; RIBEIRO, J. H.; DANDERFER F.1991. A Geologia da região de Lagoa Santa e Sete Lagoas. In: Projeto VIDA, CPRM, Belo Horizonte. Relatório Técnico.

URUSHIBARA – YOSHINO, K. 1993. Human Impacto n Karst Soils: Japanese and Other Examples. Cremlingen. Catena Supplement 25, 219-233.

VERHEYE, W.H. 1989. Impact des proprietes Hydrodynamiques du substrato karstique sur la nature dusol em milieu mediterraneen. Karstologia, n. 14, p 1-8.

WANG, S.J., LIU, Q.M., ZHANG, D.F., 2004. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. Land Degradation. Dev. 15, 115–121.

WARMING, E. 1908. Contribuição para a geografia phytobiológica. Belo Horizonte, Imprensa Oficial do Estado de Minas Gerais (tradução do dinamarquês por Alberto Loefgre). Reeditado pela EDUSP em 1973 e 1982.386p.

WILLIAMS. P. W. 1971. Ilustrating morphometric analysis of karst with exemples from New Guinea. Zeitschrift für Geomorph, n 15, p. 40-61.

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

WHITE, E. L.; WHITE, W. B. 1968. Dynamics of sediment transport in limestones caves. NSS Bulletin. V. 30, n. 4, p. 115-129.

WHITE, W.B. 1984. Rates processes: Chemical kinetics and karst landform development. In: Grounwater as a geomorphic Agent. R.G. Lafleur Ed. (Allen an Unwin, Boston) p. 227-248.

WHITE, W. B. 1988. Geomorphology and hydrology of karst terrains. Oxford University Press. 464p.

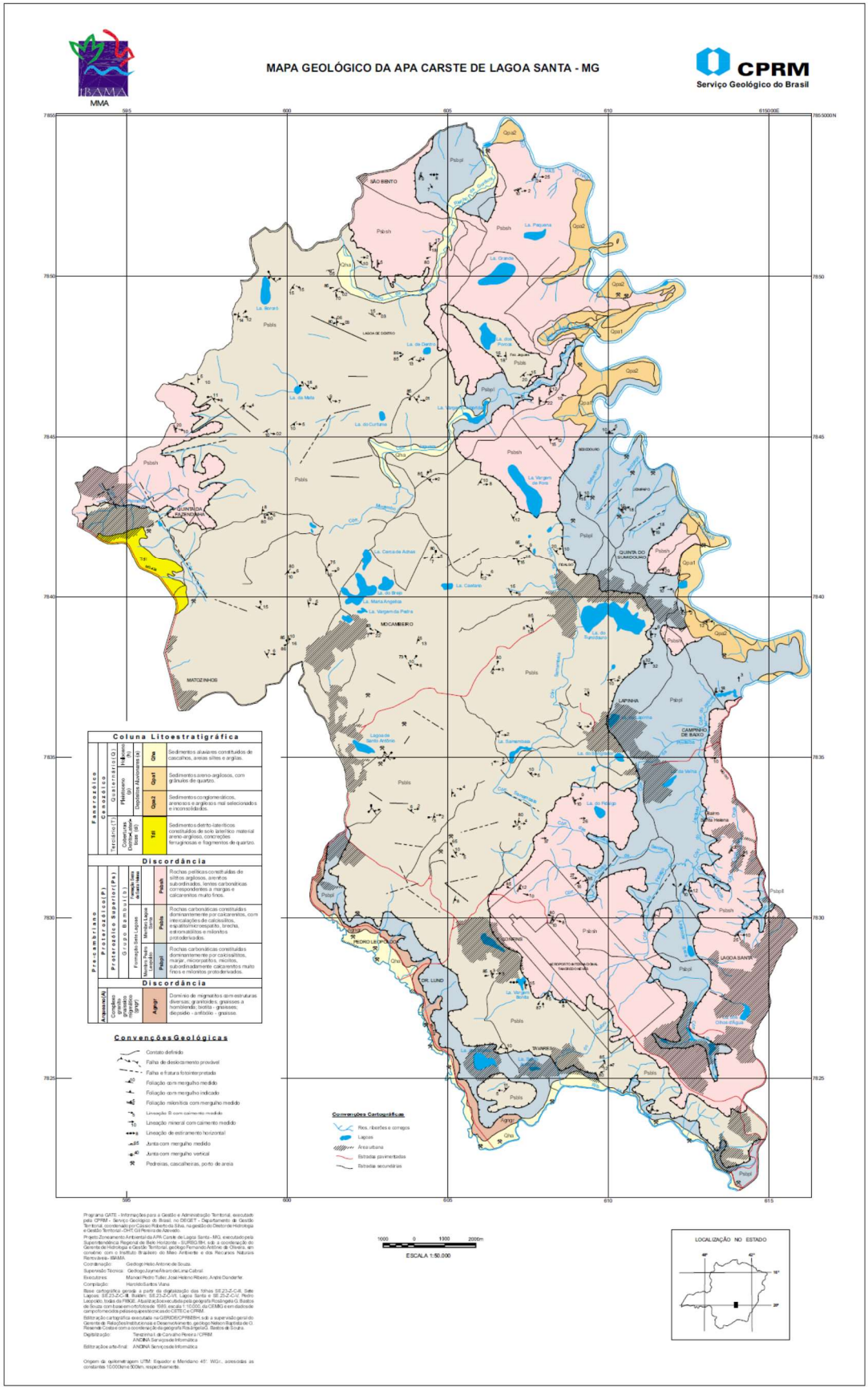
YUAN, D. (Ed.) 1991. Karst of China. 1 ed. Beijing: Geological Publishing

YUAN, D. 1993. Environmental Change and Human Impact on Karst in Southern China. Cremlingen. Catena Supplement 25. p 99 – 107.

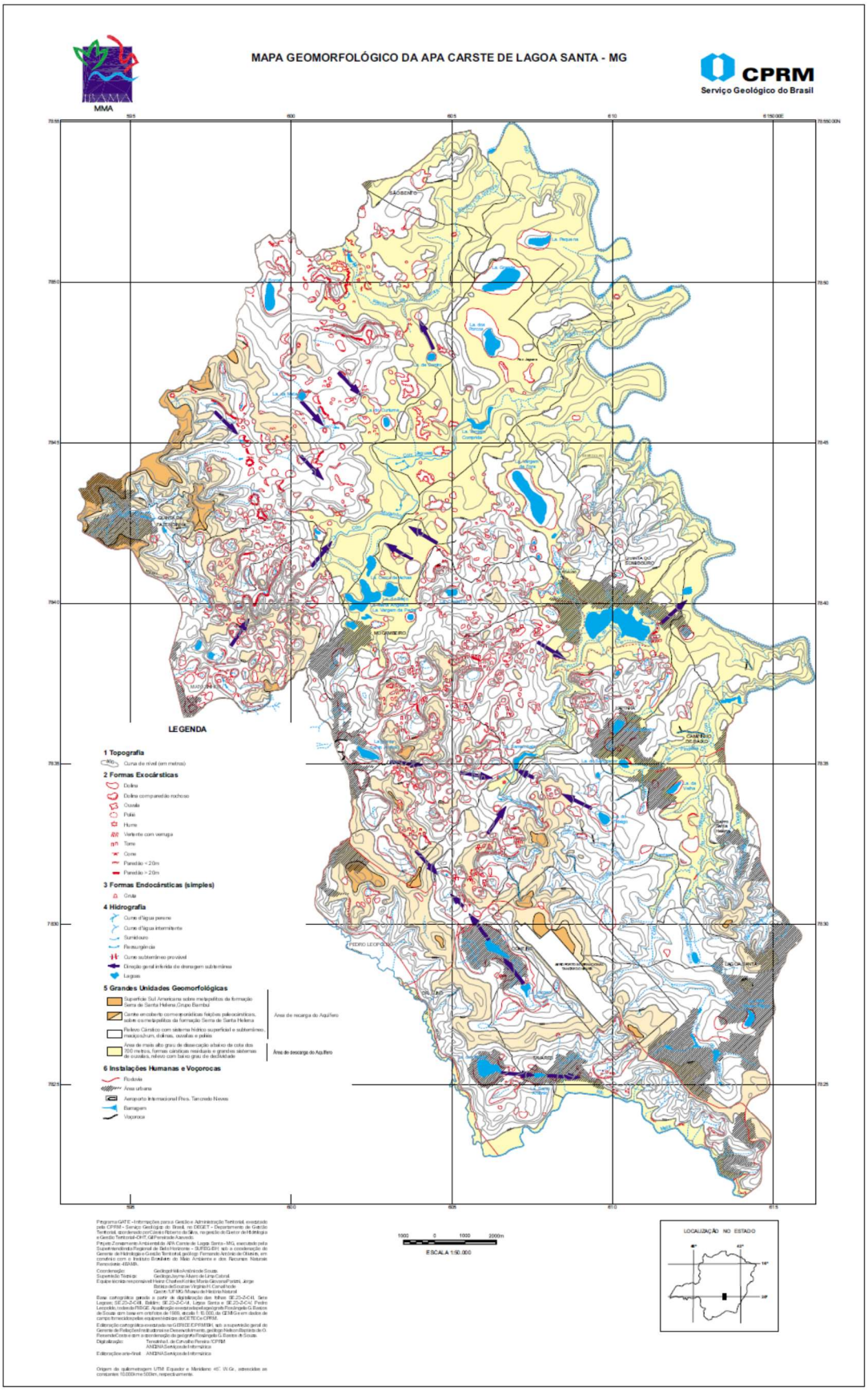
.

ANEXOS:

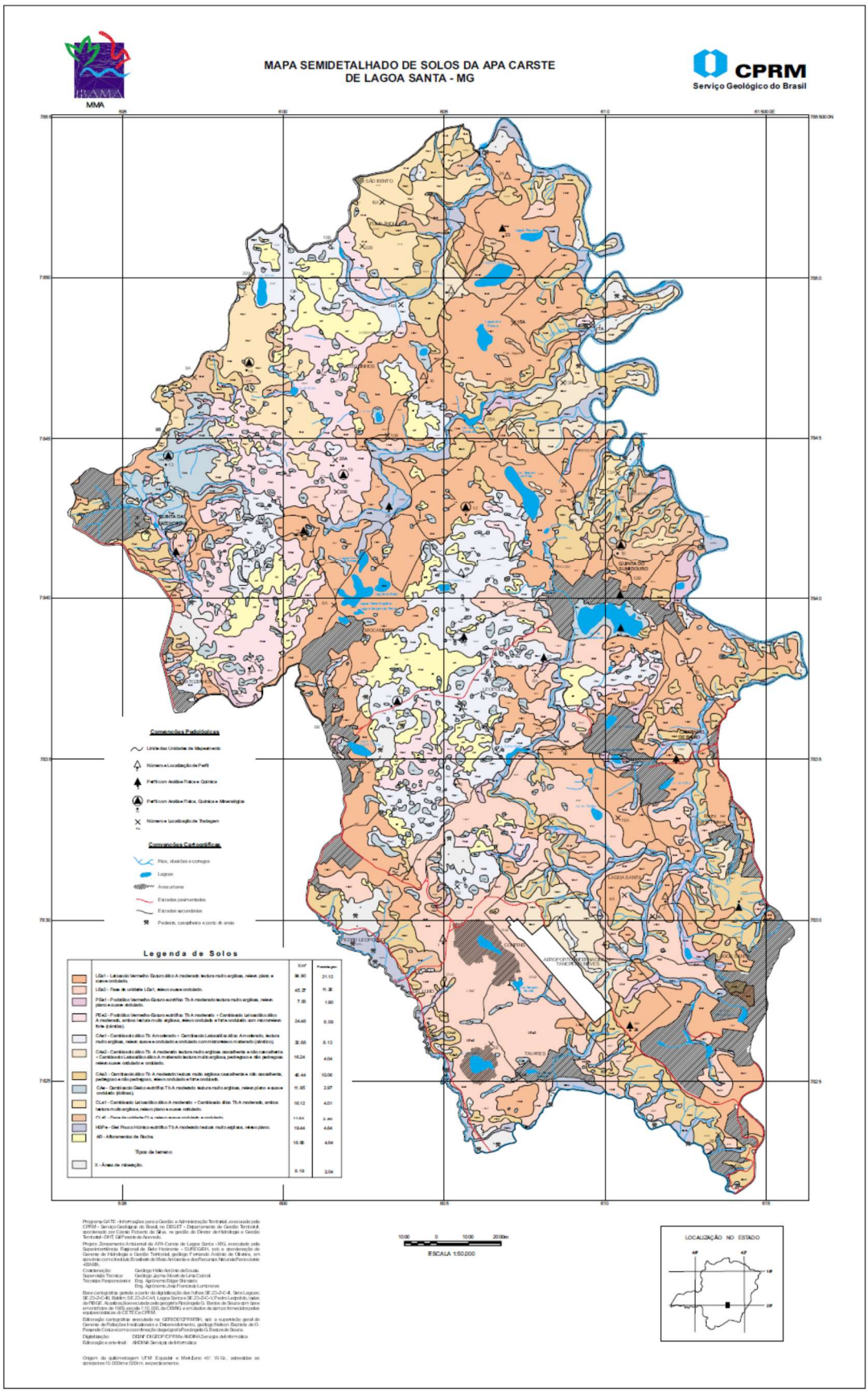
Anexo 1. Mapa Geológico da APA Carste de Lagoa Santa



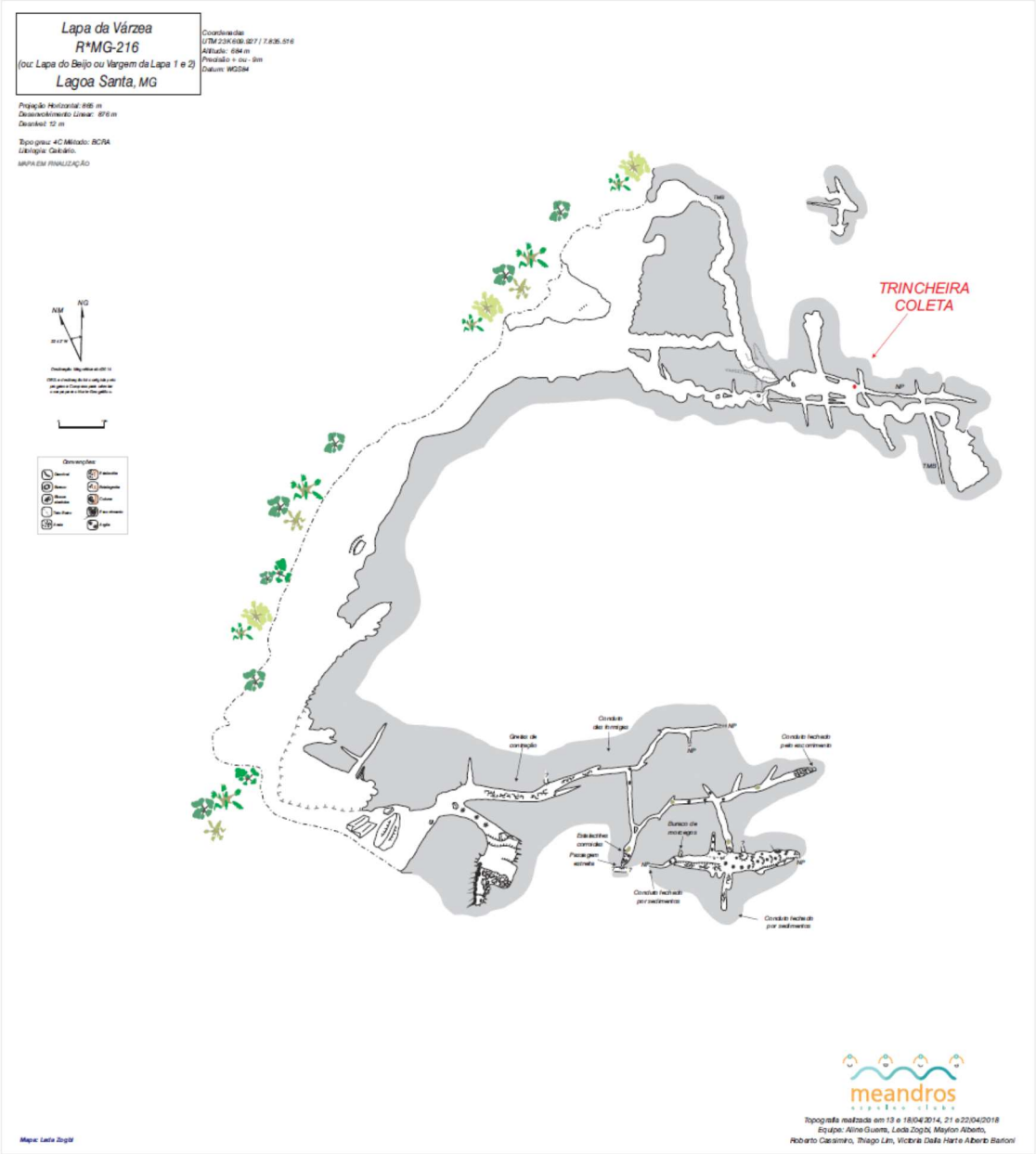
Anexo 2. Mapa Geomorfológico da APA Carste de Lagoa Santa



Anexo 3: Mapa Pedológico da APA Carste de Lagoa Santa



Anexo 4: Mapa do Sistema Vargem da Lapa e Lapa do Beijo



Anexo 5: Ficha de Descrição de Perfis Pedológicos

PERFIL: P1

CLASSIFICAÇÃO: Cambissolo

LOCALIZAÇÃO: 609449/7836213

SITUAÇÃO E DECLIVE: Trincheira aberta em interflúvio de topo plano (declividade < 1%)

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Serra de Santa Helena

MATERIAL ORIGINÁRIO: Siltitos

RELEVO LOCAL: Plano

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado

ALTITUDE: 752m

EROSÃO: Laminar ligeira

DRENAGEM: Bem drenado

PEDREGOSIDADE: Pedregoso

ROCHOSIDADE: Não rochoso

VEGETAÇÃO E USO ATUAL: Cerrado/pastagem (Brachiaria)

A 00 - 28cm vermelho amarelado (5YR 5/6, seco); argilosa; blocos subangulares pequenos; muito compacto, transição plana e gradual.

B 28 - 103cm vermelho (2,5YR 4/6, seco); argilosa com muitos cascalhos; blocos angulares médios; macio; transição plana e gradual.

C 103 – 142cm vermelho (2,5YR 5/6, úmido); argilosa; blocos angulares médios; macio; transição gradual e irregular.

Rocha 142 - ++cm: Material de alteração com presença de estruturas do filito; médio argilosa; macio; cerosidade abundante.

PERFIL: P2

CLASSIFICAÇÃO: Cambissolo Latossólico

LOCALIZAÇÃO: 609631/7835698

SITUAÇÃO E DECLIVE: Perfil aberto em terço médio; declividade 15%

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Serra de Santa Helena

MATERIAL ORIGINÁRIO: Siltitos

RELEVO LOCAL: Ondulado

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado

ALTITUDE: 714m

EROSÃO: Laminar ligeira

DRENAGEM: Bem drenado

PEDREGOSIDADE: Pedregoso

ROCHOSIDADE: Não rochoso

VEGETAÇÃO E USO ATUAL: Cerrado/pastagem (Brachiaria)

A 00 - 18cm bruno avermelhado (2,5YR 4/4, seco); muito argilosa com muitos cascalhos; granular pequena; ligeiramente dura, transição plana e gradual.

B 18 - 37cm vermelho (2,5YR 5/8, seco); argilosa com muitos cascalhos; blocos subangulares pequenos; solta; transição plana e gradual.

C 37 – +cm vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmido); muito argilosa; blocos subangulares médios; macio; transição gradual e plana

PERFIL: P3

CLASSIFICAÇÃO: Latossolo

LOCALIZAÇÃO: 609449/7836213

SITUAÇÃO E DECLIVE: Trincheira aberta em terço inferior declividade 2%.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Sete Lagoas, Membro Lagoa Santa

MATERIAL ORIGINÁRIO: Calcário

RELEVO LOCAL: Plano

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado

ALTITUDE: 695m

EROSÃO: Laminar

DRENAGEM: Bem drenado

PEDREGOSIDADE: Pedregoso

ROCHOSIDADE: Não rochoso

VEGETAÇÃO E USO ATUAL: Cerrado/milho

A 00 - 16cm bruno-avermelhado (5YR 5/6, seco); muito argilosa; blocos subangulares pequenos; dura, transição plana e abrupta.

B 16 - 58cm bruno-avermelhado (2,5YR 4/6, seco); muito argilosa; blocos subangulares médios; macio; transição plana e gradual.

C 58 – +cm bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 5/6, úmido); muito argilosa; blocos subangulares médios; ligeiramente dura.

Anexo 6: Descrição analítica das coletas de solo e sedimento

Análise Química Perfil 1:

Determinações	Unidades	Amostras		
		Horizonte 0-28cm	Horizonte 28-103cm	Horizonte >103cm
pH_H2O	-	6,1	6,5	5,3
pH KCl	-	5,1	4,6	4
M.O Titulação	$g.kg^{-1}$	2	2	24
Fósforo Mehlich 1	$mg.kg^{-1}$	<5	<5	<5
Potássio Mehlich 1	$mmolc.kg^{-1}$	2,5	0,7	0,4
Cálcio kCl 1 mol/L	$mmolc.kg^{-1}$	57	21	2
Magnésio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	1	2	<0,1
Alúminio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	1	2	38
H+Al Acetato de Cálcio	$mmolc.kg^{-1}$	2	17	66
SB	$mmolc.kg^{-1}$	61,5	22,7	2,4
CTC	$mmolc.kg^{-1}$	63,5	39,7	68,4
V	%	97	57	4
m	%	2	8	94

Análise Química Perfil 2:

Determinações	Unidades	Amostras		
		Horizonte 0-18cm	Horizonte 18-47cm	Horizonte > 47cm
pH_H2O		5,8	6	6,7
pH KCl	-	5	4,2	4,3
M.O Titulação	$g.kg^{-1}$	9	6	32
Fósforo Mehlich 1	$mg.kg^{-1}$	<5	<5	<5
Potássio Mehlich 1	$mmolc.kg^{-1}$	1,2	0,3	0,3
Cálcio kCl 1 mol/L	$mmolc.kg^{-1}$	39	7	3
Magnésio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	2	1	<0,1
Alúminio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	7	8	13
H+Al Acetato de Cálcio	$mmolc.kg^{-1}$	44	26	25
SB	$mmolc.kg^{-1}$	42,2	8,3	3,2
CTC	$mmolc.kg^{-1}$	86,2	34,3	28,3
V	%	49	24	12
m	%	14	49	80

Análise Química Perfil 3:

Determinações	Unidades	Amostras		
		Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
pH H2O	-	5,9	6,1	5,8
pH KCl	-	4,5	3,9	3,7
M.O Titulação	$g.kg^{-1}$	19	23	2
Fósforo Mehlich 1	$mg.kg^{-1}$	15	<5	7
Potássio Mehlich 1	$mmolc.kg^{-1}$	0,5	2,6	1,1
Cálcio kCl 1 mol/L	$mmolc.kg^{-1}$	63	11	6
Magnésio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	8	2	2
Alúminio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	3	43	52
H+Al Acetato de Cálcio	$mmolc.kg^{-1}$	54	83	111
SB	$mmolc.kg^{-1}$	71,5	15,6	120,1
CTC	$mmolc.kg^{-1}$	125,5	98,6	8
V	%	57	16	85
m	%	4	73	

Análise Química Amostra Caverna:

Determinações	Unidades	Amostra
		Greta
pH H2O	-	6,3
pH KCl	-	5,3
M.O Titulação	$g.kg^{-1}$	26
Fósforo Mehlich 1	$mg.kg^{-1}$	31
Potássio Mehlich 1	$mmolc.kg^{-1}$	1,9
Cálcio kCl 1 mol/L	$mmolc.kg^{-1}$	165
Magnésio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	3
Alúminio KCl 1 mol.L	$mmolc.kg^{-1}$	1
H+Al Acetato de Cálcio	$mmolc.kg^{-1}$	5
SB	$mmolc.kg^{-1}$	169,9
CTC	$mmolc.kg^{-1}$	174,9
V	%	97
m	%	1

Análise Física Perfil 1:

Determinações	Unidades	Amostras		
		Horizonte 0-28cm	Horizonte 28-103cm	Horizonte 103
Areia Total	$g.kg^{-1}$	405	455	371
Argila	$g.kg^{-1}$	507	479	436
Silte	$g.kg^{-1}$	88	66	193
Classe Textural	-	Argiloso	Argiloso	Argiloso

Análise Física Perfil 2:

Determinações	Unidades	Amostras		
		Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Areia Total	$g.kg^{-1}$	232	524	202
Argila	$g.kg^{-1}$	701	432	729
Silte	$g.kg^{-1}$	67	26	69
Classe Textural	-	Argiloso	Muito Argiloso	Muito Argiloso

Análise Física Perfil 3:

Determinações	Unidades	Amostras		
		Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Areia Total	$g.kg^{-1}$	181	119	113
Argila	$g.kg^{-1}$	655	678	685
Silte	$g.kg^{-1}$	164	203	202
Classe Textural	-	Muito Argiloso	Muito Argiloso	Muito Argiloso

Análise Física Amostra Caverna:

Determinações	Unidades	Amostra
		Horizonte 1
Areia Total	$g.kg^{-1}$	97
Argila	$g.kg^{-1}$	630
Silte	$g.kg^{-1}$	272
Classe Textural	-	Muito Argiloso